

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Příspěvek k hodnocení trvanlivosti řezných nástrojů při
upichování korozivzdorných ocelí**

Disertační práce

Studijní program:	P2346 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2303V002 Strojírenská technologie
Školitel:	prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
Doktorandka:	Ing. Šárka Malotová

Ostrava 2019

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

MALOTOVÁ, Šárka. *Příspěvek k hodnocení trvanlivosti řezných nástrojů při upichování korozivzdorných ocelí*. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB – TU Ostrava, 116 s., 57 obrázků, 17 tabulek, 3 přílohy. Disertační práce, Ostrava, 2019. Školitel: prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ve strojírenství se neustále diskutuje o povýšení strategicky významných produktů tohoto oboru, jako řezné nástroje, výrobní stroje a zařízení, tvářecí stroje, anebo stroje pro aditivní výrobu. Všechny tyto produkty vyžadují potřebný výzkum a vývoj pro jejich inovaci z důvodu kladení vyšších nároků na trvanlivost, kvalitu, přesnost, produktivitu, spolehlivost, výrobní náklady, aj.

Po vývoji progresivních řezných nástrojů, inovaci nových multifunkčních výrobních strojů je k dosažení předem stanovených cílů potřeba vhodně navrhnout celý proces obrábění včetně řezných podmínek a parametrů obrábění. Do návrhu procesu obrábění vstupují různé faktory, jako obráběcí stroje, materiály řezných nástrojů a řezná geometrie, obráběný materiál a jeho struktura, řezné podmínky, přičemž je nutná znalost dané technologie. Za účelem zvýšení některého ze stěžejních faktorů, trvanlivost řezného nástroje, kvalita povrchu, produktivita procesu atd., je nutné navrhnout experimentální proces obrábění na základě ověřených metod. Jednou z možností je použití metody Plánovaných experimentů, která umožňuje po zakomponování všech ovlivňujících faktorů navrhnout a analyzovat daný proces na základě výsledků zvolené odezvy.

V teoretické části práce je provedena analýza současného stavu obrábění korozivzdorných ocelí se zaměřením na technologii upichování. Cílem práce je stanovit a vyhodnotit proces upichování austenitické korozivzdorné oceli, definovat řezné podmínky, vyhodnotit opotřebení řezných nástrojů, utváření třísky a kvalitu obrobeného povrchu. Na základě těchto výsledků je nutné stanovit přínosy pro VaV, praxi a doporučit další výzkum v této oblasti.

Experimentální činnost je realizována ve spolupráci se společností DORMER Pramet s.r.o. a je zaměřena na proces upichování austenitické korozivzdorné oceli s označením dle W.Nr. 1.4404 (AISI 316L). Jedná se o legovanou ocel s vyšším obsahem chromu využívanou zejména ve všech oblastech strojírenství, jako letecký, chemický, energetický anebo zdravotnický průmysl. Předmětem experimentálního testování je navrhnout proces upichování založený na metodě Plánovaných experimentů pro plně faktoriální plán 2^k včetně řezných podmínek a parametrů při použití prototypových povlakovaných vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu navržených společností DORMER Pramet s.r.o.

ANNOTATION OF DISSERTATION THESIS

MALOTOVÁ, Šárka. *Contribution to the Evaluation of the Durability of Cutting Tools during Parting-off of Stainless Steel*. Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – TU Ostrava, 116 p., 57 figures, 17 tables, 3 annexes. Dissertation Thesis, Ostrava, 2019. Supervisor: Prof. Robert ČEP, Ph.D., MSc.

In industry, a promotion of strategically significant products of this field, such as cutting tools, machine tools and device, forming machine tools or machine for additive technology, are constantly being discussed. All these products require a needed research and development for their innovation due to place demand on durability, quality, accuracy, productivity, reliability, production costs, etc.

After development of progressive cutting tools, innovation of new multi-functional machine tools, it is necessary to appropriately design whole machining process include cutting conditions and machining parameters for achievement of pre-determined goals. Different factors, such as machine tools, cutting tools materials and cutting geometry, machined material and its structure, cutting conditions, are entering into design of machining process and a knowledge of given technology is necessary. For the purpose of increase one of this crucial factor, durability of cutting tool, surface quality, productivity of process etc., it is necessary to design an experimental machining process on the basis of verified methods. One of the possibilities is using Design of Experiment that enables to design and analysis the process after incorporation the all-influencing factors on the basis of the results of selected response.

The analysis of current state of machining of stainless steel focusing on parting-off technology is made in theoretical part of dissertation thesis. The aim of dissertation thesis is determine and evaluate parting-off process austenitic stainless steel, define cutting conditions, evaluate cutting tools wear, chip forming and quality of machined surface. It is necessary to determine benefits for R&D, practice and recommend a next research in this field on the basis of these results.

Experimental activity is carried out in cooperation with company DORMER Pramet Ltd. and it is focused on parting-off process of austenitic stainless steel marked according W. Nr. 1.4404 (AISI 316L). It is alloyed steel with high content of chromium, using especially in all areas engineering, such as air industry, chemical industry, energy industry or medical industry. The object of experimental activity is a design parting-off process based on Design of Experiment – full factorial plan 2^k included cutting conditions and parameters for used prototype coated exchangeable cutting inserts made of sintered carbide designed by DORMER Pramet Ltd.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat svému školiteli, panu prof. Ing. Robertu Čepovi, Ph.D., za vedení po celou dobu mého studia na VŠB – TU Ostrava.

Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. a paní Ing. Petře Schreiberové, Ph.D. za rady při vyhodnocení experimentální činnosti a všem kolegům z Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava za cenné rady a připomínky k této práci.

Děkuji také pracovníkům výzkumu a vývoje společnosti DORMER Pramet s.r.o., kteří mi poskytlí řezné nástroje, potřebná data k vypracování práce a zapojili mě do jejich výzkumu v oblasti testování upichovacích nástrojů.

V neposlední řadě bych chtěla ze srdce poděkovat svým rodičům, přátelům a blízkým, kteří mě po celou dobu studia na VŠB – TU Ostrava ať už finančně, tak i morálně podporovali, a i dnes v nich stále nacházím oporu v profesním i osobním životě.

Disertační práce byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

OBSAH

ÚVOD	10
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	11
1.1 Technologie upichování	11
1.1.1 Faktory doprovázející proces upichování	12
1.1.2 Řezné nástroje a vliv geometrie na upichování	16
1.1.3 Moderní trendy v upichování	19
1.2 Korozivzdorné oceli	21
1.2.1 Obrábění korozivzdorných ocelí	23
1.2.2 Řezný nástroj a volba jeho geometrie	30
1.2.3 Obrábění korozivzdorných ocelí – přehled	31
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	32
3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI OBRÁBĚNÍ	33
3.1 Obráběný materiál austenitická ocel dle W. Nr. 1.4404	33
3.2 Volba obráběcího stroje	35
3.3 Prototypové řezné nástroje a jejich (mikro)geometrie	36
4 PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU V OBLASTI TESTOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	43
4.1 Základní pojmy v oblasti plánování experimentů	44
4.2 Plný faktoriální plán 2^k	46
4.3 Grafické znázornění experimentální činnosti	49
5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI	50
5.1 Funkční testy	50
5.2 Hodnocení plánovaného experimentu – původní model	52
5.2.1 Významnost faktorů – regresní analýza	52
5.2.2 Analýza residuí	54
5.2.3 Interpretace účinků	56
5.2.4 Diagram interakcí dvou faktorů	58
5.3 Hodnocení plánovaného experimentu – optimalizovaný model	60
5.4 Optimalizace odezvy	63
6 HODNOCENÍ PROCESU UPICHOVÁNÍ	65
6.1 Opotřebení a mechanismy opotřebení	67
6.2 Tvorba třísky a segmentace	72
6.3 Mikrogeometrie povrchu	76
ZÁVĚRY	84
CONCLUSIONS	90
PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBOR	96

CONTRIBUTION FOR SCIENTIFIC DISCIPLINE	96
PŘÍNOSY PRO PRAXI.....	97
CONTRIBUTION FOR PRACTICE	97
DOPORUČENÍ NA DALŠÍ VÝZKUM	98
RECOMMENDATION FOR FURTHER RESEARCH.....	98
POUŽITÁ LITERATURA	99
VLASTNÍ PUBLIKACE	107
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	110
SEZNAM TABULEK.....	112
SEZNAM PŘÍLOH	113

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ, SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Význam	Jednotka
A	označení faktoru řezné rychlosti	[-]
A ₅	tažnost	[%]
A _α	plocha hlavního hřbetu nástroje	[-]
A' _α	plocha vedlejšího hřbetu nástroje	[-]
A _y	plocha čela nástroje	[-]
Al ₂ O ₃	označení povlaku na bázi oxidu hlinitého	[-]
AlTiN	označení povlaku na bázi hliník-titan-nitrid	[-]
B	označení faktoru posuvu	[-]
BUE	Build-Up-Edge - nárůstek	[-]
C	označení faktoru poloměru zaoblení ostří nástroje	[-]
CVD	Chemical Vapor Deposition – chemické nanášení povlaku	[-]
CNC	Computer Numeric Control – počítačové řízení	[-]
C45	označení uhlíkové oceli	[-]
D	označení faktoru mechanické úpravy leštěním	[-]
D _o	průměr polotovaru obrobku	[mm]
D ₁	vnitřní průměr polotovaru	[mm]
DOE	Design of Experiment – Metoda plánovaných experimentů	[-]
E	modul pružnosti	[GPa]
F _c	řezná složka síly řezání	[N]
F _f	posuvová složka síly řezání	[N]
F _p	pasivní složka síly řezání	[N]
H _n	tabulková hodnota pro Grubbsův test odlehlosti pro n-měření	[-]
H _o	nulová hypotéza	[-]
HB	tvrdost dle Brinella	[-]
HSC	high speed cutting – vysokorychlostní obrábění	[-]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
K	symetrie plochy čela a hřbetu řezného nástroje	[-]
L	mechanická úprava povrchu leštěním	[-]
M20 – M35	označení použitého povlaku VBD	[-]
MDT	Multi Directional Turning – více směrové soustružení	[-]
MKP	metoda konečných prvků	[-]
OMNO	oblast primární plastické deformace	[-]
P25 – P40	označení použitého povlaku	[-]

PVD	Physical Vapor Deposition – fyzikální nanášení povlaku	[-]
Q	počet upíchnutých kroužků	[ks]
Q _{nam}	počet naměřených kroužků původního modelu	[ks]
Q _{pred}	počet predikovaných kroužků původního modelu	[ks]
Q' _{nam}	počet naměřených kroužků optimalizovaného modelu	[ks]
Q' _{pred}	počet predikovaných kroužků optimalizovaného modelu	[ks]
R	poloměr žlábků utvařeče	[mm]
R ²	koeficient determinace	[%]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rp _{0,2}	mez kluzu při 0,2 %	[MPa]
Rz	maximální výška profilu drsnosti	[μm]
S-N-O-P	označení technologické soustavy	[-]
S _α	velikost zaoblení na hřbetní ploše	[μm]
S _γ	velikost zaoblení na čelní ploše	[μm]
SK	slinutý karbid	[-]
T1	označení testu č. 1	[-]
TiC	karbid titanu	[-]
TiCN	titan karbid nitridu	[-]
TiN	karbid nitridu	[-]
T	teplota tavení oceli dle W. Nr. 1.4404	[°C]
T _{As}	strojní čas	[min]
T _{MAX}	vyložení upichovacího nože	[mm]
U _C	rozšířená nejistota	[μm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
WC	karbid wolframu	[-]
X	vstupující proměnná	[-]
XYZ	označení použitých VBD	[-]
Y	sledovaná proměnná	[-]
Z	tažnost	[%]
a _p	hloubka řezu	[mm]
b	tloušťka upichovaného kroužku	[mm]
d	míra plnění optimalizace odezvy	[-]
f	posuv	[mm]
fcc	plošně středěná kubická mřížka	[-]
i	počet úběrů	[-]

k	koeficient rozšíření (pokrytí)	[-]
l	délka vyložení polotovaru	[mm]
ln	vyhodnocovaná délka profilu	[mm]
lr	základní délka profilu	[mm]
n	počet měření	[-]
pH	potential of hydrogen – potenciál vodíku	[-]
r_ϵ	nástrojový poloměr špičky	[mm]
r_n	poloměr zaoblení ostří řezného nástroje	[μm]
$S_{(x)}$	směrodatná odchylka měření	[μm]
t	tloušťka gradientu	[μm]
u_A	standardní nejistota typu A	[μm]
u_B	standardní nejistota typu B	[μm]
u_{B1}	velikost nejistoty opěrné patky přístroje	[μm]
u_{B2}	velikost nejistoty měřicího přístroje	[μm]
u_C	kombinovaná nejistota	[μm]
v_c	řezná rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
w	šířka upichovacího nože	[mm]
\bar{x}	výběrový průměr	[μm]
x	šířka fazetky	[mm]
x_i	i-té měření ze souboru dat	[mm]
α	úhel hřbetu	[°]
α^{95}	hladina významnosti při 95 %	[-]
α_o	úhel hřbetu v rovině ortogonální	[°]
β_o	úhel břitu v rovině ortogonální	[°]
γ	úhel čela	[°]
γ^{Fe}	intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ	[-]
γ_o	úhel čela v rovině ortogonální	[°]
δ	úhel stříhu	[°]
λ	měrná tepelná vodivost při 100 °C	[$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
λ_c	mezní vlnová délka	[mm]
σ_o	pevnost v ohybu	[MPa]
ρ	měrná hmotnost	[$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]

ÚVOD

Oblast strojírenství patří mezi jedny z nejnáročnějších odvětví, jelikož se vyznačuje velkou pestrostí výrobků, různých komponent a spadá do něj mnoho oborů. Výroba přesných součástí vyžaduje technicky moderní stroje a zařízení, které umožňují realizovat vysoké a extrémní nároky na přesnost výroby, kvalitu obrobené povrchu, maximální požadavky na výkon, spolehlivost a produktivitu procesu. Mezi hlavní výzvy strojírenství patří obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů a superslitin, dosažení vysoké trvanlivosti a životnosti řezných nástrojů, zvýšená spolehlivost, nároky na disponibilní čas strojů a jejich univerzálnost. Pro monitoring a správný průběh procesu obrábění je důležité nastavení vstupních parametrů a podmínek obrábění. Vlivem široké oblasti obtížně definovaných materiálů jako jsou pokročilé kovy, polymery a kompozitní materiály je nutné zohlednit pokud možno všechny faktory vstupující do procesu obrábění. Nevědomost a nízká znalost problematiky často vede ke zvýšení nákladů na výrobní proces.

Pochopení řezného procesu a vytipování možných problémů jsou jedny z nejdůležitějších kroků pro zachování bezpečného, technicky a ekonomicky výhodného průběhu obrábění. Proces obrábění není jen výrobní technologie, ale souvisí s ní i jednotlivé faktory a procesy, které je nutné dodržet pro správnému fungování. Jedná se zejména o návrh řezných podmínek, volbu geometrie a mikrogeometrie řezného nástroje a parametrů obrábění. Před zahájením každé operace je nutné si uvědomit a správně specifikovat důležitost faktorů, které mohou ovlivnit výsledek. Z pohledu návrhu experimentální činnosti obrábění je nutné vycházet z již ověřených metod a technik, které je možné aplikovat na konkrétní situaci.

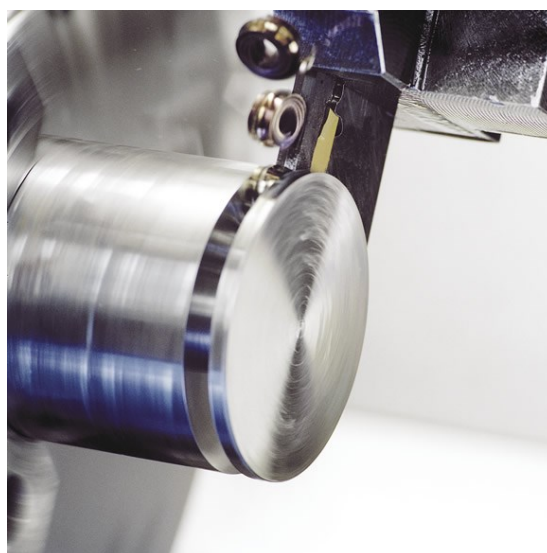
Statistické metody se zabývají hodnocením jakéhokoliv procesu, umožňují vylepšit a nadefinovat podmínky vedoucí k lepším výsledkům. Díky těmto metodám lze celý děj blíže specifikovat, a tak účinněji předejít rizikům, která by mohla mít negativní vliv na vývoj a hodnocení procesu obrábění. Implementací metod Plánovaných experimentů dojde k optimalizaci a rychlejšímu zavedení nových progresivních a inovativních technologií do výroby.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

1.1 Technologie upichování

Upichování (obr. 1.1) neboli oddělování finálního výrobku od polotovaru je jedna z posledních operací při výrobě strojních součástí a velmi často se s ní lze setkat u hromadné výroby např. při výrobě ložiskových kroužků. Na první pohled se upichování může zdát jako jednoduchý krok v celém výrobním procesu, ale jedná se o zvláštní způsob soustružení, který vyžaduje pozornost zejména z hlediska bezpečnosti a návrhu celého procesu obrábění. Důležité je zmínit zejména utváření a odchod třísky z místa řezu. Špatně zvolenou geometrií řezného nástroje nebo řeznými podmínkami může docházet k nabalování třísky na nástroj, což způsobuje vyšší mechanické a tepelné zatížení břitu, které ovlivňuje trvanlivost řezného nástroje, ale i kvalitu obrobeného povrchu. Studium procesu upichování za účelem jeho optimalizace může vést ke zvýšení trvanlivosti nástroje a produktivity výroby.

Upichování patří mezi operace soustružení a je často porovnáváno s technologií čelního soustružení, přičemž se řezný nástroj pohybuje kolmo k ose obrobku. Hlavním rozdílem je, že upichovací nástroje mají speciální tvar geometrie, která má schopnost tvořit úzké drážky. Během upichování je materiál obrobku v kontaktu na obou stranách řezného nástroje, přičemž má množství odebraného materiálu schopnost redukovat řezné síly a snižovat riziko průhybu tenkostěnných součástí nebo komponent malých průměrů.^{1,2}



Obr. 1.1 Technologie upichování²

Z pohledu kinematiky procesu upichování koná hlavní řezný pohyb obrobek a vedlejší pohyb je realizován řezným nástrojem a koná přímočarý posuvný pohyb kolmo na osu obrobku. Pokud jsou otáčky vřetena konstantní a řezný nástroj se pohybuje plynule kolmo k ose obrobku, dochází k postupnému snižování řezné rychlosti v závislosti na jeho průměru do doby, než je řezná rychlost

nulová. Její pokles má výrazný vliv na zatížení řezného nástroje. Z toho důvodu je u moderních CNC obráběcích strojů možno nastavit konstantní řeznou rychlost v celém průřezu obrobku. Stabilita při technologii upichování je jedním z kritických faktorů pro proces.

Pro úspěšné provedení operace je důležité mít na paměti následující: ^{3, 4}

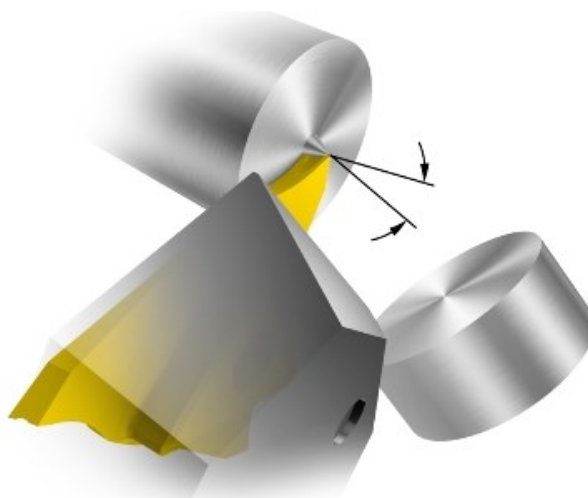
- vysoká houževnatost slinutého karbidu,
- dostatečný prostor pro odchod třísky z místa řezu,
- odvod tepla ze zóny řezání,
- stabilní upnutí.

Při upichování hrají velkou roli dva aspekty, a to bezpečnost a produktivita. Při správné volbě řezného nástroje a nastavení procesu je možné se vyvarovat mnoha problémům, jako je tvorba čepu, poškození řezného nástroje vyštípnutím jeho špičky, zhoršení kvality obrobeného povrchu, zvýšení řezných sil a nežádoucích vibrací, špatnému utváření a odchodu třísky z místa řezu. ^{3, 4, 5, 6}

1.1.1 Faktory doprovázející proces upichování

- Tvorba výčnělků – „čepů“

Jedním z charakteristických znaků pro upichování plného materiálu je tvorba malého výčnělku tzv. čepu na čelní ploše obrobku, viz obr. 1.2. Při upichování kroužků vzniká po vnitřním obvodě nežádoucí otřep. Během upichování je součást hlavně namáhána na ohyb a při rotaci obrobku dochází k cyklickému namáhání až do doby, kdy dojde k odlomení hotové součásti a vzniku výše zmíněného čepu. ^{2, 4}



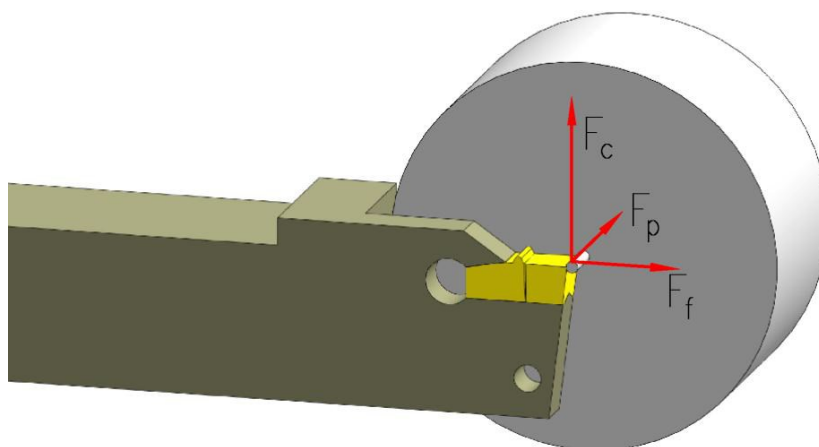
Obr. 1.2 Tvorba čepu při upichování ⁵

Jeho tvar a velikost jsou ovlivněny geometrií řezného nástroje, zejména velikostí úhlu nastavení hlavního ostří κ_r . Při použití tzv. levých nebo pravých destiček s ostrou geometrií, kde úhel nastavení hlavního ostří není roven 90° a ostří nástroje je tedy šikmé, se snižuje tvorba čepu. Zvýšení úhlu κ_r je efektivnější pro redukci čepů, ovšem na úkor nižší pevnosti a životnosti břitu řezného nástroje

a nižší kvality obrobeného povrchu. Úhlové provedení ($\kappa_r \neq 90^\circ$) břitových destiček je používáno hlavně při malém vyložení řezného nástroje. Velikost čepu je také ovlivněna působením odstředivé síly v kombinaci s hmotností vyráběné součásti. Podepřením nestabilních obrobků, změnou řezných podmínek či vhodnou geometrií nástroje lze redukovat velikost posuvové složky síly řezání F_f a omezit tvorbu čepu.^{5,7}

- **Řezné síly, vibrace a vyložení nástroje při upichování**

Působení a rozložení silového zatížení při upichování je velmi důležité, viz obr. 1.3. V případě upichování s neutrální destičkou, pasivní (axiální) složka síly řezání F_p působí kolmo na směr posuvu, tedy v ose obrobku a měla by nabývat nulových hodnot. Během obrábění může dojít k naměření nenulové hodnoty této složky síly řezání a její velikost dosahuje cca 20 N. Nenulová hodnota je ovlivněna špatným utvářením třísky anebo kontaktem ploch vedlejších hřbetů řezného nástroje s obrobenou plochou způsobenými vibracemi při obrábění.^{7,8,9}



Obr. 1.3 Silové rozložení řezných sil při upichování⁵

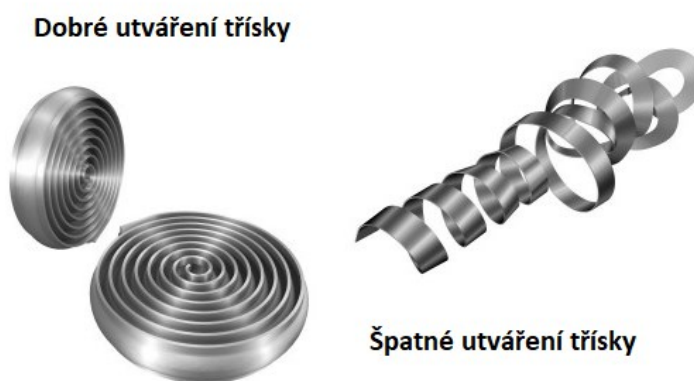
Vznik a výskyt velkých vibrací je problém zejména u upichování ($D_o \leq 112$ mm) a hlubokých zápichů. Vznikající drážka je široká jen několik milimetrů, přičemž zde není takový prostor na odchod třísky a hrozí její uvíznutí. V důsledku toho mechanicky a tepelně zatěžuje břit nástroje a poškozuje obrobený povrch. Tomuto lze předejít například použitím přerušovaného posuvu, který usnadňuje lámání třísky. Samotné vibrace lze redukovat například volbou většího průřezu nástrojového držáku nebo jeho upřednostněním před použitím planžety. Tato varianta však není vždy vhodným řešením z důvodu menšího pracovního prostoru ve stroji. Řešením může být použití tvrdokovového těla nebo zvolení aktivního tlumení vibrací s využitím tělesa vyrobeného z uhlíkového kompozitu.^{1,4,7}

Přítomnost vibrací souvisí s průhybem držáku, který ovlivňuje životnost nástroje a celkovou nestabilitu řezného procesu. S tím je spojeno vyložení řezného nástroje, které je nutno zkrátit na minimální možnou hodnotu. Toto je důležité zejména při upichování s použitím úzkých břitových destiček, které vyžadují stabilní podmínky a šetrné zacházení. Kratším vyložením je zajištěna také

lepší rovinnost nástroje a jeho průhyb se snižuje s třetí mocninou. Pro variantu s dlouhým vyložením je doporučeno použít různé řezné geometrie v kombinaci s dolní hodnotou doporučeného posuvu u použité VBD. ^{7, 10}

- **Utváření třísky při upichování**

Utváření a odchod třísky je kontrolovatelný proces a jeho výsledek je důležitý pro plynulý chod obrábění. Během upichování je nástroj v interakci po obou stranách s materiálem obrobku a není zde dostatek prostoru pro správné utváření třísky. Výsledkem je dlouhá tříska, viz obr. 1.4, která má tendenci uvíznout ve vzniklé drážce, poškodit obrobený povrch a snížit životnost řezného nástroje.



Obr. 1.4 Utváření třísky při upichování ⁵

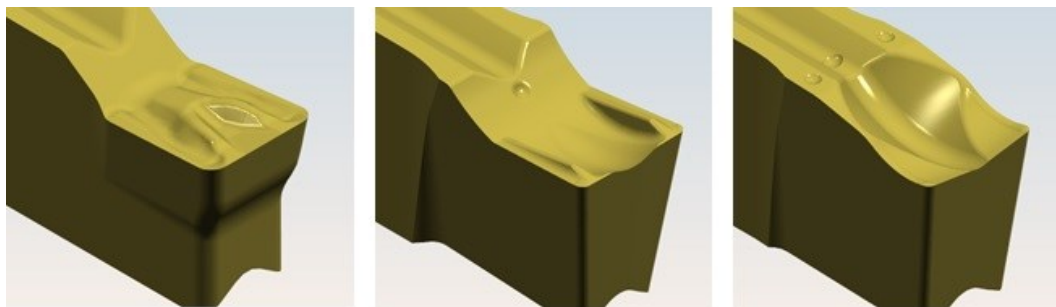
Důležité je, aby třísky opouštěly vytvářený zápich okamžitě a nebylo nutné často přerušovat řez. Správný tvar třísky je stáčen podélně do spirály. Problémy se špatnou tvorbou třísky jsou způsobeny typem obráběného materiálu, špatně zvolenou řeznou geometrií a nevhodně nastavenými řeznými podmínkami.

Pro zabezpečení trvalého utváření třísky je nutno sledovat následující faktory: ^{10, 11, 12}

- opotřebení břitů,
- bezchybný stav utvařeče třísek,
- správný úhel nastavení hlavního ostří,
- správná poloha nástroje vůči obrobku,
- velikost posuvu,
- použití chlazení.

Řízené utváření a odvod třísek je důležité sledovat zejména při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou korozi-vzdorné oceli, slitiny na bázi niklu a kobaltu, titan a jeho slitiny. Utváření třísky při obrábění těchto materiálů závisí na absorbování a změkčování třísek teplem vzniklým během obrábění. Například při obrábění slitin titanu jsou produkovány tuhé třísky, které mají problém s odlamováním. Z těchto důvodů jsou břitové destičky opatřeny nejrůznějšími utvařeči, viz

obr. 1.5, aby docházelo k plynulému utváření a lámání třísky. Geometrie utvařeče třísek popisuje skutečný tvar plochy čela nástroje. Při utváření třísky se vlivem utvařeče začne tříska ohýbat a navinovat. Poté se odlomí a odchází pryč z místa řezu. Hlavním faktorem je přetváření třísky, a tím vyčerpání její plasticity. Přetváření třísky je realizováno utvařečem jak v příčné, tak v podélné rovině. Výrazný vliv na tvorbu třísky má i použití procesního média během obrábění, které pomáhá odplavovat třísky odcházející z místa řezu. Problém se může vyskytnout z důvodu špatně nastaveného tlaku, umístění, případně nasměrování proudu chladicí kapaliny.^{1, 3, 5, 11}



Obr. 1.5 Příklady utvařečů vhodných pro upichování¹³

- **Opotřebení řezných nástrojů při upichování**

Mnoho problémů vznikajících během obrábění kovů souvisí s opotřebením řezných nástrojů. Správné načasování výměny řezného nástroje vede k zamezení rizika zhoršení kvality obrobeného povrchu. Zatížení břitu nástroje, ať už tepelné nebo mechanické, vede k urychlenému poškození břitu v podobě forem mechanismů opotřebení. Opotřebení musí být předvídatelné, kontrolovatelné a bezpečné. V opačném případě dochází k poškození ostří, které je nepřijatelné a ohrožuje spolehlivost procesu. Jedná se o vyštípnutí břitu a lomu břitu nástroje, které je charakteristické pro upichovací nástroje.

Opotřebení řezných nástrojů pro upichování je způsobeno maximální teplotou ostří a teplotním gradientem. Jejich charakter je dán zejména vlastnostmi a strukturou obráběného materiálu, materiálem řezného nástroje, jeho geometrií a v neposlední řadě chlazením a řeznými podmínkami. Velký vliv na opotřebení nástroje během upichování má také poloha řezného nástroje vůči obrobku. K dosažení co nejlepší kvality povrchu a životnosti řezného nástroje je nutná průběžná kontrola břitu. Nejčastějším typem poškození je opotřebení hřbetu nástroje způsobené abrazivním otěrem povlaku a následně substrátu VBD zejména za snížené řezné rychlosti. Z tohoto důvodu je doporučeno použít destičky s povlakem odolnějším vůči abrazivnímu opotřebení. Při vysokých řezných rychlostech dochází k poškození řezného nástroje formou plastické deformace břitu. Při upichování těžkoobrobitelných materiálů např. korozivzdorných ocelí dochází často k ulpívání materiálu na povrch břitu nástroje v podobě nárůstku. Odtržením jeho nestabilní části dochází k vylomení břitu nástroje. Tvorbě nárůstku lze předejít nastavením vyšší řezné rychlosti a použitím

ostřejší geometrie nástroje. Další formou opotřebení je tvorba vrubu na břitu řezného nástroje v místě, kde břit vychází ze záběru. Tvorba vrubu je ovlivněna zpevněním povrchové vrstvy obráběného materiálu a také vysokou teplotou v místě řezu.^{6, 10, 12, 14, 15}



Obr. 1.6 Mechanismy opotřebení upichovacích nožů⁵

1.1.2 Řezné nástroje a vliv geometrie na upichování

Zvyšující se nároky na technologii obrábění ovlivňují vývoj a konstrukci nástrojů. Vhodně zvolenou technologií obrábění, parametry obrábění, volbou materiálu a řeznou geometrií lze dosáhnout požadovaných kritérií obrábění. Proto výrobci nástrojů přinášejí inovativní řešení, aby koncoví uživatelé mohli těžit z minimálních nákladů na výrobu a současně zvyšovat produktivitu.

Řezné nástroje pro upichovací a zapichovací operace mají zcela odlišnou konstrukci v porovnání s nástroji určenými např. pro podélné soustružení. Upichovací vyměnitelné břitové destičky jsou nejčastěji dvoubřité s šířkou několika milimetrů a s úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 90^\circ$. Úhlovou modifikací břitu nástroje ($\kappa_r \neq 90^\circ$) lze docílit zamezení tvorby čepy na úkor horší kvality obrobeného povrchu. V případě operace vypichování se nože podbrušují tak, aby bok břitu nedřel o vnější průměr vypichovaného obrobku.

Při upichování korozivzdorných ocelí je nutné se vyvarovat tvorbě otřepů a zbytkových čepů. Z toho důvodu je doporučeno použít pozitivní geometrii řezného nástroje s vyšší řezivostí. Geometrie řezného nástroje má také vliv na velikost řezných sil, vývoj opotřebení a výslednou kvalitu obrobeného povrchu.^{1, 16, 17}

Výrobce řezných nástrojů ISCAR ČR s.r.o. nabízí inovativní nástrojové systémy určené pro nejrozumnější kombinace obrábění a jako první nabídl trhu sjednocení metody soustružení a zapichování do jednoho nástroje. Navrženým systémem Self-Grip dosáhl ISCAR ČR s.r.o. zkrácení výrobních časů a snížení počtu nástrojů pro výrobu jednoho kusu výrobku. Upichování těžkoobrobitelných materiálů (superslitiny na bázi Ni, Co, titan a jeho slitiny) je problematické z hlediska vzniku vysoké teploty v zóně řezání a špatného přívodu chladicí kapaliny do místa řezu v prostoru úzké drážky. ISCAR nabízí nástrojový systém Jet-Cut, kde jsou integrální držáky a planžety opatřeny přívodem chladicí kapaliny vyústěné přímo na čelní plochu destičky. Tato konstrukce dostatečně eliminuje tepelné zatížení břitu, a zvyšuje tak životnost řezného nástroje. Mezi další

sofistikované nástroje společnosti lze zařadit zapichovací a upichovací destičky Pentacut, které mají zcela odlišnou konstrukci v podobě hvězdice s pěti břity po obvodu. Výhodou těchto nástrojů je větší upichovací hloubka, možnost podélného soustružení a vyšší produktivity.

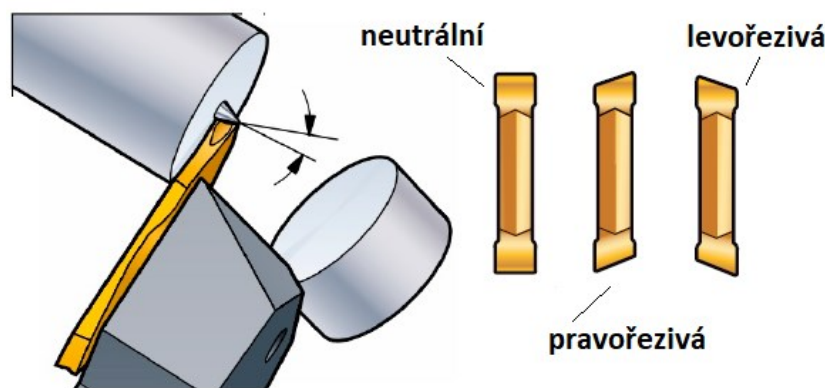
Mezi další inovátory řezných nástrojů v oblasti upichování a zapichování je možné zmínit společnosti SANDVIK Coromant, Walter CZ s.r.o., Seco Tools CZ, s.r.o. nebo DORMER Pramet s.r.o., které se zaměřují na inovaci řezných nástrojů a hledání řešení, jak dosáhnout při obrábění co nejlepšího výsledku s ohledem na maximální výkonnost a požadovanou životnost řezného nástroje. Rozšíření sortimentu řezných nástrojů je spojeno s vývojem řezného materiálu a jeho povlaku, makro a mikro geometrií řezné části a utvařeče třísek. Těmito úpravami je zpravidla dosažena vyšší kvalita, řezivost a trvanlivost nástroje, lepší kvalita obrobeného povrchu, což má za následek vyšší produktivitu procesu obrábění.^{17, 18, 19}

- **Makrogeometrie ostří řezného nástroje**

Upichovací destičky jsou obvykle konstruovány s dvěma řeznými částmi, které tvoří plocha čela, plocha hlavního a dvou ploch vedlejších hřbetů. Břit nástroje je konstruován s pozitivní nebo negativní geometrií. Pozitivní geometrie v kombinaci s rovnou plochou čela poskytuje vyšší řezivost, nižší řezné síly a obecně lepší odvod třísek. Její nevýhodou je menší relativní pevnost. Pozitivní geometrie je volena také s ohledem na obráběný materiál, a to při upichování neželezných materiálů (slitiny hliníku, mědi a plastických materiálů). Negativní geometrie zaručuje pevnější břit, způsobuje vyšší řezné síly, větší tepelné zatížení a špatný odvod třísek z místa řezu. Součástí geometrie břitu VBD je negativní fazetka, která je po celé délce hlavního ostří a jejím účelem je zvýšit pevnost břitu zejména za nepříznivých podmínek např. při přerušovaném řezu. Šířka fazetky je navržena s ohledem na hodnotu posuvu, který musí být stanoven tak, aby hloubka odebraného materiálu překročila šířku fazetky a bylo docíleno bezpečného utváření pomocí přítomného utvařeče.

Úhel nastavení hlavního ostří κ_r – řezné nástroje pro upichování mohou být „neutrální“, a to v případě, že a úhel nastavení hlavního ostří κ_r je roven 90° . Tento typ destiček je typický i pro zapichovací operace. V porovnání s variantou „levořezivé“ nebo „pravořezivé“ VBD ($\kappa_r > 90^\circ$) zajišťuje efektivní tvorbu třísky, dobrou kvalitu obrobeného povrchu, nízké riziko vibrací, dobrou stabilitu procesu a vysokou radiální složku síly řezání. Společnost SANDVIK Coromant doporučuje hodnoty úhlu nastavení hlavního ostří od 95° až 110° v závislosti na počtu břitů destičky, viz obr. 1.7. Tyto geometrie mají pozitivní vliv na omezení tvorby výčnělků a otřepů při upichování trubek. Úhlové provedení (použití šikmého břitu) je doporučeno použít pro malá vyložení nástroje. Šikmá varianta zvyšuje axiální řeznou složku síly, vibrace, zhoršuje kvalitu obrobeného povrchu, má v zásadě negativní vliv na životnost vyměnitelných břitových destiček a stabilitu procesu upichování,

protože dochází k jejich vytlačování do strany. Při nastavení vysoké hodnoty úhlu může dojít ke zhoršení kvality povrchu a obrobená plocha může být konkávní nebo konvexní.^{1, 4, 5}



Obr. 1.7 Typy destiček dle velikosti úhlu nastavení hlavního ostří a jeho vliv na tvorbu čepu¹⁶

Úhel čela γ – úhel čela ovlivňuje zejména tvorbu třísky. Jeho zvýšením dochází k intenzivnějšímu pěchování, které způsobuje vyšší tepelné zatížení bříty nástroje, což má za následek poškození bříty. Pozitivní úhel čela má vliv na vznik malých řezných sil a tlak působící na obrobek během obrábění. Menší radiální složka síly řezání redukuje velikost výsledného čepu. S ostřejší variantou geometrie však dochází k zeslabení bříty a nižší relativní pevnosti.^{1, 5, 6, 18}

Úhel hřbetu α – bezpečné vyjetí nástroje z řezu je podmíněno odpovídající velikostí úhlu hřbetu. Ten ovlivňuje podmínky tření na hřbetě nástroje, jeho opotřebení a tuhost. Zmenšením úhlu dojde ke zvětšení úhlu bříty nástroje a ke zvýšení tuhosti. Pro pevnější a tvrdší materiály (ocel, litina, těžkoobrobitelné materiály) jsou doporučovány menší hodnoty úhlu hřbetu, kdy se jejich hodnota pohybuje mezi 5 – 7°. S větším úhlem hřbetu souvisí i špatný odvod tepla z místa řezu, kdy dochází k nakumulování tepla v oblasti špičky a je ovlivněna pevnost bříty. Větší hodnoty úhlu hřbetu $\alpha = 11^\circ$ jsou doporučovány pro upichování měkčích a houževnatých materiálů, jako jsou hliníkové slitiny.^{6, 16, 18}

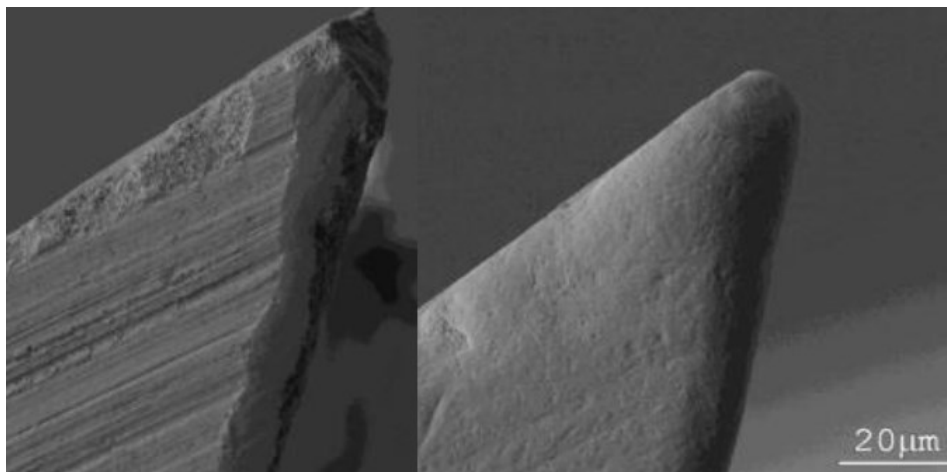
Poloměr špičky nástroje r_ϵ – úkolem menšího poloměru špičky nástroje je snížit tlak na bříty nástroje a vytvořit menší čep po upíchnutí na ploše obrobku. Velikost špičky nástroje je podmíněna i řeznými podmínkami. S větším poloměrem špičky lze použít vyšší posuvy a dosáhnout tak požadované trvanlivosti řezného nástroje. Při obrábění s větším poloměrem špičky dochází k redukci řezné složky síly řezání F_c , a naopak ke zvětšení pasivní složky síly řezání F_p . Nejčastěji pro operace upichování je hodnota poloměru špičky zvolena $r_\epsilon = 0,2 \text{ mm}$ s ohledem na obráběný materiál. Čím je poloměr špičky nástroje menší, tím se redukuje výsledný čep na straně obrobku.^{6,}

^{16, 18}

- **Mikrogeometrie ostří**

Pod pojmem mikrogeometrie ostří si lze představit geometrické útvary v řádech několika mikrometrů charakterizující břit nástroje, jeho drsnost a mikroskopické defekty. Vady, jako jsou přelisky, mikrotrhliny, povrchové vady a napěťové stavy, vznikají při výrobě řezného nástroje a mohou způsobit předčasné vyštípnutí ostří, nestabilitu procesu a negativně ovlivnit funkci řezného nástroje. Zejména u slinutých karbidů dochází při řezném procesu k vytrhávání tvrdých karbidů pojiva, což má za následek předčasné ukončení životnosti řezného nástroje. Technologie řízené úpravy ostří je nedílnou součástí výrobního procesu VBD, a to z důvodu zvyšování jejich užitečných vlastností. Zaoblením ostří řezného nástroje lze docílit vyšší pevnosti a odolnosti břitu proti namáhání, snížení nerovností na povrchu ostří, zamezení vzniku mikrotrhlin a pórů, viz obr. 1.8. ^{22, 23, 26}

Stav ostří je i po broušení charakterizován velmi malým poloměrem zaoblení, který dosahuje velikost až 5 μm . Kvalita břitu nástroje je velmi důležitá zejména u nástrojů určených k povlakování. Během nanášení povlaku je povrch kopírován a zmíněné nerovnosti ovlivňují adhezi mezi substrátem a povlakem. Úprava mikrogeometrie řezného nástroje se provádí z důvodu odstranění defektů a nerovností na břitu nástroje, zvýšení jeho relativní pevnosti, zvýšení životnosti, lepší přilnavosti povlaku, zlepšení kvality obrobené plochy, správné tvorby třísky a rozložení sil během obrábění. ^{23, 24, 26}

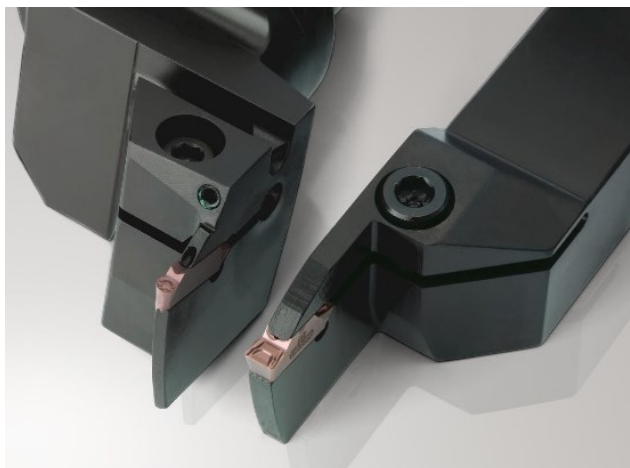


Obr. 1.8 Úprava mikrogeometrie břitu řezného nástroje ²⁴

1.1.3 Moderní trendy v upichování

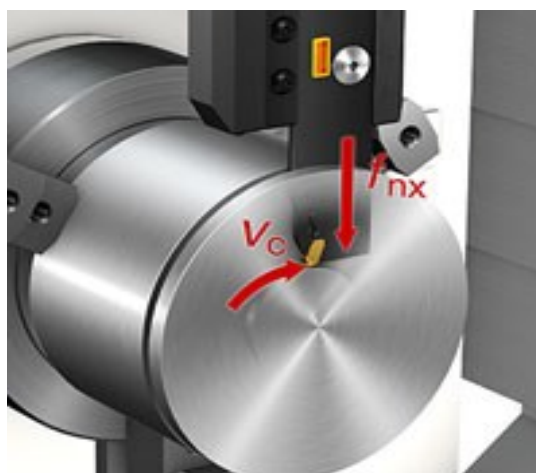
Dva nejdůležitější faktory při upichování jsou bezpečný chod obrábění a produktivita. S procesem upichování souvisí řada problémů, kterým lze předejít během přípravy procesu a volby řezného nástroje. V současnosti se většina výrobců řezných nástrojů zabývá problematikou upichování a na trh uvádějí novinky, které vylepšují proces. ²⁷

Výrobce Seco Tool CZ s.r.o.¹⁹ představil na trhu systém tvarového soustružení MDT, viz obr. 1.9 – Multi Directional Turning. Tento systém je vhodný pro aplikace soustružení, tvarování, zapichování, upichování a dokonce řezání závitů. Metoda Secoloc zajišťuje stabilitu a bezpečnost spolu s vysokou produktivitou a výkonností. Využitím tohoto systému odpadá nutnost složité výměny nástrojů, což snižuje jejich počet. Velkou výhodou je pozitivní vliv na úsporu obrábění. Součástí systému je i vysokotlaké chlazení Jetstream Tooling, které je směřováno přímo do místa řezu. Břit není tak tepelně zatěžován a nehrozí předčasné zkrácení životnosti.



Obr. 1.9 Systém tvarového soustružení Seco MDT¹⁹

Novinku, kterou uvedla na trh společnost SANDVIK Coromant, je upichování v ose Y – koncepce CoroCut QD, viz obr. 1.10. Během upichování se velká část řezné síly odvíjí od řezné rychlosti a zbylá část je příčinnou posuvu. Vlivem výslednice řezných sil, která působí na nástroj pod úhlem 30°, jsou planžety silně zatěžovány. Řešením je snížení planžety vyložení anebo zvětšení výšky nástroje. Otočením lůžka VBD o 90° a využití osy Y pro posuv nástroje je docíleno působení výslednice řezných v místě, kde má nástroj největší tuhost. Toto řešení zajišťuje stabilnější a tišší proces upichování bez nežádoucích vibrací a vyšší kvality obrobeného povrchu. Díky tomuto řešení lze použít vyšší posuvy v porovnání s původním upnutím planžet a destiček o šířce 3 mm.²⁰



Obr. 1.10 Koncepce CoroCut QD – upichování v ose Y²⁰

Dalším průkopníkem v oblasti upichování je společnost ISCAR, která představila na trhu upgradovaný systém DO-Grip pro upichovací destičky, viz obr. 1.11. Na vyměnitelných břitových destičkách je navrženo konstrukční řešení v podobě otvoru, který je vyústěný na čelní ploše pro přívod řezné kapaliny. Chladicí kapalina se tak přímo dostává k ostří nástroje pod utvářenou třísku. Toto řešení je zaměřeno zejména na problematiku obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Při obrábění těchto materiálů dochází ke vzniku vysoké teploty v místě řezu z důvodu nízké tepelné vodivosti materiálu, proto je důležitý dostatečný přívod kapaliny do místa řezu.²¹



Obr. 1.11 Systém Jet-cut ISCAR²¹

1.2 Korozivzdorné oceli

V dnešní době korozivzdorné oceli mnohem častěji nahrazují běžné konstrukční oceli. Zejména v chemickém průmyslu je jejich volba jediným řešením z hlediska provozních podmínek, životnosti, bezpečnosti, aj. Jejich zastoupení lze nalézt i v leteckém, energetickém a chemickém průmyslu. Vybrané korozivzdorné oceli se řadí dle ISO 513: 2002 do skupiny těžkoobrobitelných materiálů, které je vyznačují speciálními vlastnostmi jako je vysoká pevnost, tvárnost materiálu a zejména odolnost proti korozi. Odolnost proti korozi je zajištěna množstvím chromu ve struktuře, který vytváří na povrchu obrobku souvislý, přilnavý a ochranný film. Chrom je zde zastoupen minimálně 10,5 % spolu s dalšími prvky, jako je nikl ($Ni < 30 \%$), mangan ($Mn < 2,5 \%$), molybden (Mo) nebo měď (Cu).

V dnešní době je na trhu k dispozici široká škála korozivzdorných ocelí. V závislosti na převažujících prvcích v mikrostruktuře materiálu je lze rozdělit do čtyř skupin. Každá z nich je specifická svými vlastnostmi a použitím. Jedná se o korozivzdorné oceli feritické, austenitické, martenzitické a duplexní, viz obr. 1.12.^{28, 29, 30, 31}



Obr. 1.12 Rozdělení korozivzdorných ocelí s ukázkou jejich mikrostruktur³⁰

- **Feritické oceli**

Feritické oceli jsou rozděleny do dvou skupin, a to podle množství obsahu chromu v mikrostruktuře. Mechanické vlastnosti těchto ocelí predikují jemnozrnnou strukturu, která je upravena tepelným zpracováním. Vlivem nízkého množství chromu, cca 11 % (např. ocel W. Nr. 1.4003, 1.4512) je korozní odolnost těchto ocelí výrazně omezena na použití pouze v atmosférických podmínkách. Mezi zvláštní přednosti feritických korozivzdorných ocelí v porovnání s ostatními patří jejich vysoká odolnost proti transkrystalové korozi při mechanickém napětí. Tyto oceli mají také dobrou tvárnost a tažnost za vysokých teplot a jsou magnetické. Vzhledem k nedostatku niklové složky jsou tyto oceli velmi dobře obrobitelné. Opatření řezných nástrojů při obrábění tohoto typu oceli se projevuje abrazivní opotřebením na hřbetě nástroje a vznikem žlábků na čele.^{29, 30, 31}

Příklad feritické korozivzdorné oceli: W. Nr. 1.4003; 1.4515; 1.4016.

- **Martenzitické oceli**

Martenzitické korozivzdorné oceli obsahují 12 % Cr a přibližně 0,12 % C. Vlivem daného množství uhlíku dochází ke vzniku martenzitické tvrdé a abrazivní struktury. Oceli mají nižší odolnost proti korozi, vyšší pevnost a tvrdost. Martenzitické oceli jsou magnetické a v žíhaném stavu jsou lépe obrobitelné. Přidáním molybdenu a niklu lze vylepšit nejen mechanické vlastnosti, ale i vylepšit korozní odolnost. Tyto oceli jsou feromagnetické a dají se tepelně zpracovávat. Obvykle mají velmi nízkou odolnost proti korozi v porovnání s ostatními korozivzdornými oceli. Projev opotřebení je velmi podobný jako u obrábění feritických ocelí.^{29, 30, 31}

Příklad martenzitické korozivzdorné oceli: W. Nr. 1.4301; 1.4305; 1.4541.

- **Austenitické oceli**

Skupina austenitických ocelí zahrnuje přes 70 % celkové výroby korozivzdorných ocelí. Tyto oceli obsahují maximálně 0,15 % uhlíku a minimálně 16 % chromu v mikrostruktuře. Austenitické oceli s 8 % niklu jsou velmi vhodné pro tepelné zpracování, vyčnívají příznivými mechanickými

vlastnostmi a vysokou odolností proti korozi. A naopak jsou náchylné ke koroznímu praskání a ze všech typů korozivzdorných ocelí jsou obtížně obrobitelné. Oceli jsou nejvýznamnější skupinou korozivzdorných ocelí a mají mnohostranné využití. Austenitické oceli nejsou magnetické a na rozdíl od martenzitických ocelí nejsou kalitelné a mají vysoký sklon k deformačnímu zpevnění. Austenitické oceli jsou rozděleny do třech skupin z pohledu přesného množství legur. Jedná se o oceli chrom-niklové, chrom-mangan-niklové a chrom-manganové. Mechanické zpevnění způsobuje tvrdý povrch a vznik tvrdých třísek, které mají za následek opotřebení řezného nástroje ve formě vrubu. U této oceli dochází také ke vzniku nárůstku na břitu nástroje.^{31, 32, 33}

Příklad austenitické korozivzdorné oceli: W. Nr. 1.4311; 1.4318; 1.4406; 1.4439.

- **Duplexní oceli**

Struktura duplexních ocelí neboli austeniticko-feritických je složena ze dvou krystalických struktur – austenitu a feritu. Procentuální obsah každé fáze závisí na chemickém složení a tepelném zpracování. Tyto materiály primárně obsahují dostatečné množství chromu a niklu. Duplexní oceli mají až dvakrát vyšší žárupevnost a žáruvzdornost a jsou obtížněji obrobitelné v porovnání s austenitickými oceli. Vyznačují se lepší odolností proti koroznímu praskání než u austenitické oceli, mají dobrou tažnost a pevnost, ale jejich houževnatost je nízká. Pevné třísky mají tendenci se zasekávat a ovlivňovat velikost řezných sil. Velké teplo v místě řezu má za následek vznik plastické deformace a rychlé opotřebení ve tvaru žlábků na čelní ploše nástroje.^{30, 31}

Příklad austenitické korozivzdorné oceli: W. Nr. 1.4462; 1.4468; 1.4470.

1.2.1 Obrábění korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli jsou vysoce legované materiály a v průběhu obrábění je nutné se vyvarovat velkému dynamickému zatížení, odolat vysokému abrazivnímu opotřebení, zajistit chemickou stabilitu a dostatečný odvod tepla z místa řezání. Důraz je potřeba klást i na tuhost a výkon obráběcího stroje s ohledem na rozsah otáček u vřetena nebo velikost posuvu. Při obrábění těchto ocelí je nutné uvažovat i s vyššími náklady na opotřebení a životnost řezných nástrojů. Zejména při přerušovaných řezech vznikají silné vibrace a nehomogenita materiálu obrobků může způsobit předčasný lom řezného nástroje. Vlivem vysoké teploty řezání a velkého měrného tlaku dochází k přeměně austenitické struktury na martenzit a vznikají tvrdé karbidy.

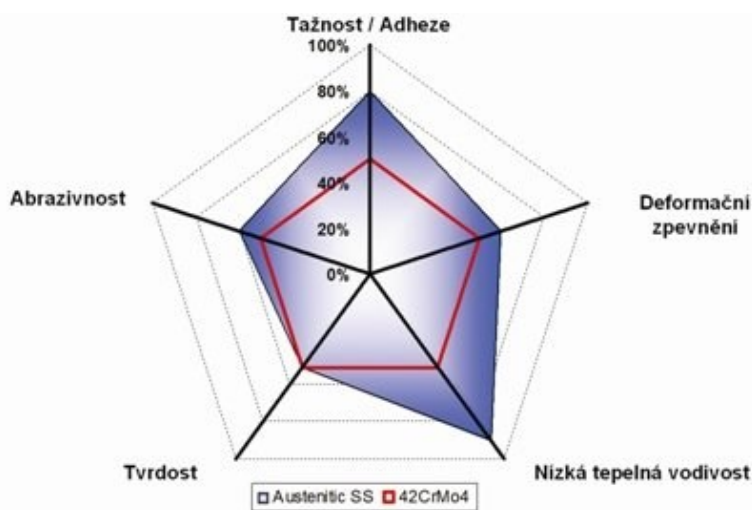
Pro obrábění korozivzdorných ocelí jsou nejčastěji používány nástroje z povlakového slinutého karbidu, případně nástroje z rychlořezné oceli. Vysoká pevnost oceli v kombinaci s tažností způsobuje zhoršené utváření a odchod třísky z místa řezu. To může být zdrojem vibrací i ovlivnění výsledného povrchu a nižší životnosti řezného nástroje. Výrobci řezných nástrojů doporučují minimální vyložení a stabilní upnutí nástroje, zejména pro vrtání a vnitřní soustružení. Důležitá je pravidelná kontrola stavu nástroje, aby nedošlo k intenzivnímu opotřebení a k poškození

obrobeného povrchu. V neposlední řadě je doporučeno omezit velikost tepla v zóně řezání použitím intenzivního chlazení přímo do místa řezu.

Obrábění korozivzdorných ocelí je velmi obtížné, které je doprovázeno vysokými dynamickými silami, problematickou tvorbou třísky, sklonem k nalepování materiálu – tvorba nárůstku a opotřebení ve tvaru vrubu na ostří destičky.^{28, 31, 34, 35}

- **Obrobitelnost korozivzdorných ocelí**

Z pohledu technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších technologických vlastností obráběného materiálu. Je to schopnost materiálu „odolávat“ řeznému nástroji za definovaných řezných podmínek. Obrobitelnost je definována jako míra schopnosti daného materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Literatura Obrobitelnost austenitické oceli³³ charakterizuje obrobitelnost jako technologickou vlastnost materiálu obrobku určující snadnost či obtížnost jeho obrábění. Obrobitelnost je dána jak vlastnostmi materiálu obrobku (mechanické a fyzikální vlastnosti, chemické složení, způsob výroby, poměr legujících prvků, tepelné zpracování), tak i parametry obrábění (technologie obrábění, druhem a vlastnostmi řezného nástroje, geometrie a řezné podmínky). Korozivzdorné oceli vyžadují odlišný přístup při volbě parametrů obrábění, řezných nástrojů a volbě řezných podmínek. Obecně je obrobitelnost ovlivněna pěti základními vlastnostmi těchto materiálů, a to tažností, tendencí k deformačnímu zpevnění, tepelnou vodivostí, tvrdostí a abrazivností. Na obrázku 1.13 jsou zobrazeny rozdíly austenitické korozivzdorné oceli s legovanou ocelí 42CrMo4.^{12, 15, 33, 36}



Obr. 1.13 Diagram základních vlastností austenitické oceli³⁷

Tažnost (přilnavost) – korozivzdorné oceli jsou charakteristické vyšší tažností než běžné uhlíkové oceli, proto musí být nástroj vyroben z materiálu s vyšší houževnatostí a opatřen povlakem s vyšší odolností proti adhezi a ostrou geometrií pro snadné utváření třísky. V porovnání s běžnou uhlíkovou ocelí je nutné nastavit pro obrábění vyšší řeznou rychlost pro zamezení adheze materiálu.

Nejčastější formou opotřebení řezné nástroje je vylamování ostří z důvodu vzniku nárůstku a tvorby vrubového opotřebení.

Deformační zpevnění – korozivzdorné ocelí mají vyšší sklony k deformačnímu zpevnění. Po prvním kontaktu řezného nástroje s materiálem se vytváří na povrchu materiálu tvrdá vrstva, která ovlivňuje zatížení břitu řezného nástroje. Z toho důvodu je vyžadována ostřejší geometrie břitu nástroje, aby nedošlo k deformačnímu zpevnění a vzniku vrubového opotřebení, případně k vylamování ostří nástroje.

Nízká tepelná vodivost – korozivzdorné oceli mají nižší tepelnou vodivost, z toho důvodu je nutné vzniklé teplo odvádět z místa řezu zejména třískami. V opačném případě by množství tepla přecházelo do břitu nástroje, který by byl vystaven velkému tepelnému namáhání. Volba řezné rychlosti a posuvu je nutná zvolit pečlivě s ohledem právě na vzniklé teplo v místě řezu, aby se předešlo vzniku plastické deformace.

Tvrdost – korozivzdorné oceli mají srovnatelnou tvrdost s běžnými uhlíkovými oceli, s čímž souvisí i velikost řezných sil.

Abrazivnost – abrazivnost korozivzdorných ocelí je vysoká, z toho důvodu jsou kladeny velké požadavky na typ a vlastnosti naneseného povlaku. Použité povlaky musí být otěruvzdorné a odolné vůči abrazi pro zajištění životnosti řezného nástroje a zamezení vzniku rychlých lomů.^{30, 38, 39,}

S každým legujícím prvkem se teplota martenzitické přeměny na teplotní stupnici posouvá směrem dolů. Další možností, jak zlepšit obrobiteľnost, je aplikace procesního média. I přesto některé typy chladicích kapalin, jejich pH nebo objemový průtok může dramaticky ovlivnit obrobiteľnost jednotlivých materiálů.^{30, 32, 34}

Obrobiteľnost korozivzdorných ocelí je dána legujícími prvky a jejich obsazením v mikrostruktuře materiálu.

- **Vliv legujících prvků na obrobiteľnost korozivzdorné oceli**

Korozivzdorné oceli mají horší obrobiteľnost než běžné uhlíkové oceli, a to vlivem vyššího počtu legujících prvků. Mezi hlavní legující prvky patří **chrom, uhlík, nikl a molybden**. Korozivzdorné oceli jsou známi především vysokým obsahem chromu, a to okolo 17 %. **Chrom** způsobuje tvrdé karbidy, zvyšuje abrazivní opotřebení řezného nástroje a snižuje tepelnou vodivost obrobku. Dále **molybden, wolfram a nikl** zvyšují pevnost a houževnatost materiálu a zhoršují jeho obrobiteľnost. **Dusík** zvyšuje pevnost u austenitických ocelí a ovlivňuje strukturu stejně jako nikl. **Měď** vylepšuje odolnost proti korozi v určitých kyselinách. Pro zvýšení obrobiteľnosti austenitických ocelí je doporučeno zvětšit množství obsahu **síry** na 0,15 až 0,30 %. Obsah tohoto legujícího prvku zajistí lepší lámavost třísky, hladší povrch obrobku a menší opotřebení řezného nástroje. Jelikož s rostoucím obsahem síry klesá odolnost proti korozi, je hodnota 0,3 % nastavena jako limitní pro

tento typ obráběných materiálů. U austenitických ocelí je doporučeno udržovat množství uhlíku nad 0,15 %. V opačném případě dochází ke zhoršení obrobitelnosti materiálu. Hodnota **manganu** u nízkouhlíkových ocelí v kombinaci se **sírou** příznivě ovlivňuje obrobitelnost. V opačném případě působí negativně na opotřebení řezného nástroje. Ostatní prvky, jako je **titan** nebo **vanad**, neovlivňují obrobitelnost, ale způsobují zvýšené silové zatížení během obrábění. Nepatrné navýšení hodnoty **fosforu** může pozitivně ovlivnit obrobitelnost materiálu a zajistit tak lepší lámavost a kratší třísky.^{30, 32, 34}

• Opotřebení řezných nástrojů

Tribologické (smýkání třísky přes plochu čela), mechanické (řezné síly) a i chemické nebo tepelné vlivy způsobují snížení životnosti řezných nástrojů. Opotřebení břitu je považováno za fyzikální jev, který by měl být bezpečný, kontrolovatelný a předvídatelný. Během obrábění jsou řezné nástroje vystaveny různým formám mechanismům opotřebení – abraze (mechanické opotřebení), adheze (fyzikálně-mechanické opotřebení), únava a eroze a chemické (difuze a oxidace), viz obr. 1.14. Intenzita mechanických typů opotřebení je závislá na tvrdosti obráběného materiálu a vlastnostech nástrojového materiálu za daných řezných podmínek.^{11, 14, 15}

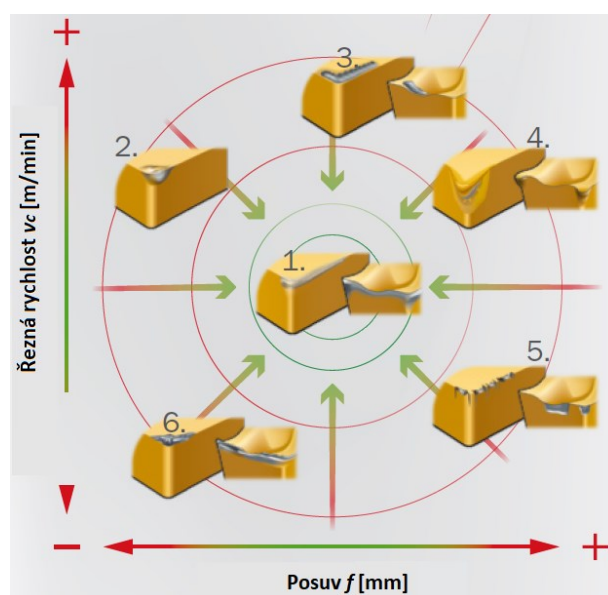


Obr. 1.14 Mechanismy opotřebení řezných nástrojů¹⁴

Opotřebení řezného nástroje závisí na:¹⁴

- řezné geometrii (geometrie stykových ploch),
- řezných silách a teplotě (zatížení),
- řezné rychlosti a posuvu (valivá a kluzná rychlost),
- řezném prostředí (vnější podmínky obrábění),
- mechanických, tepelných, chemických a metalurgických vlastnostech řezného nástroje a materiálu obrobku,
- fyzikálních, tepelných a chemických vlastnostech maziv a procesních kapalin.

Pro nalezení kontrolovatelného průběhu opotřebení bříty je nutné se zaměřit právě na zmíněné mechanismy opotřebení. Nejvhodnější opotřebení řezného nástroje je abrazivní otěr na hřbetu nástroje. Se změnou posuvu a řezné rychlosti lze docílit různých forem opotřebení, které snižují trvanlivost bříty nástroje, viz obr. 1.15. V případě projevu nepředvídatelného poškození nástroje, za které může být považován lom nástroje, vylamování bříty aj., je nutné modifikovat parametry řezného procesu, jako jsou druh materiálu obrobku, typ řezného materiálu a jeho geometrie, použitá technologie a v neposlední řadě jsou to řezné podmínky. Důležité je také stanovit mezní velikost, tzv. kritérium opotřebení, které určí, kdy břit nástroje už není schopen obrábět. Výhodou větší trvanlivosti řezného nástroje je snížení nákladů, přičemž může dojít k neočekávanému lomu a ke snížení spolehlivosti procesu.



Obr. 1.15 Optimalizace opotřebení bříty řezného nástroje ¹⁶

Projevem abrazivního opotřebení je **otěr na hřbetu nástroje** a postupné narušení povrchu funkčních ploch bříty. Jeho vzniku napomáhají velmi tvrdé mikročástice a vměstky karbidu nebo obrobku, které se zasekávají do povlaku řezného nástroje. K opotřebení dochází stejnoměrným obroušováním plochy po celé jeho délce. Otěr na hřbetu se projevuje u všech materiálů a jeho výskyt lze redukovat snížením řezné rychlosti, zvýšením posuvu nebo použitím otěruvzdornějšího povlaku.

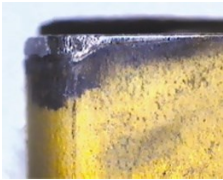





Kombinací difuze a abrazivního opotřebení dochází během obrábění ke vzniku **výmolu na čele**. Vlivem vyššího tepla je s odcházející třískou uvolňován karbid wolframu a spolu s uhlíkem, který se pojí na materiál třísky, dochází ke vzniku výmolu na čele, a to zejména u korozivzdorných ocelí a slitin na bázi niklu a titanu.

Mezi další typy opotřebení patří **vrub na ostří nástroje**, který je příčinou tvrdšího materiálu obrobku, případně deformačně zpevněné povrchové vrstvy materiálu u odlitků a výkovků. Vlivem tepelných cyklů, tepelného a mechanického zatížení se vytváří na ostří **tepelné hřebenové trhliny**,

a to při procesu frézování a přerušovaném soustružení. **Vyštípnutím destičky** je způsobeno nadměrným opotřebením jednoho nebo více výše zmíněných forem opotřebením. Vylomením břitu dojde k ukončení životnosti VBD.

Nejčastější formy opotřebení při obrábění korozivzdorných ocelí je **drobné vylamování břitu**, kterému předchází tvorba **nárůstku** na ostří nástroje způsobena vysokou tažností korozivzdorné oceli, viz tab. 1.1, **tvorba vrubu** vlivem náchylnosti oceli k mechanickému zpevňování, které je definované jako lokalizované extrémní opotřebení vzniklé třením. Nanesením vhodného povlaku nebo nastavením proměnlivé hloubky řezu lze tuto formu opotřebení eliminovat. Tvorba nárůstku je projevem adhezivního opotřebení, které je způsobeno vysokým tlakem, afinitou obráběného materiálu a dostatečnou teplotou v místě řezu. Nárůstek se vyskytuje ve formě nalepené vrstvy obrobeného materiálu na ostří nástroje. V první fázi se nárůstek jeví jako žádaný a přebírá funkci řezného klínu, protože má vyšší tvrdost. Naopak jeho přítomností dochází ke změně geometrie břitu nástroje a může ovlivnit výsledný obrobený povrch. Po odlomení nestabilní části nárůstku může dojít k vyštípnutí ostří nástroje. Tvorbu nárůstku lze eliminovat zvýšením řezné rychlosti, použitím ostřejší geometrie, případně aplikací procesního média. Vlivem zmíněné nižší tepelné vodivosti některých korozivzdorných ocelí může docházet k opotřebení v podobě **plastické deformace**. Při obrábění korozivzdorných ocelí může dojít k neočekávanému lomu. VBD ^{14, 15, 17, 28}

Tab. 1.1 Formy opotřebení VBD ¹⁶

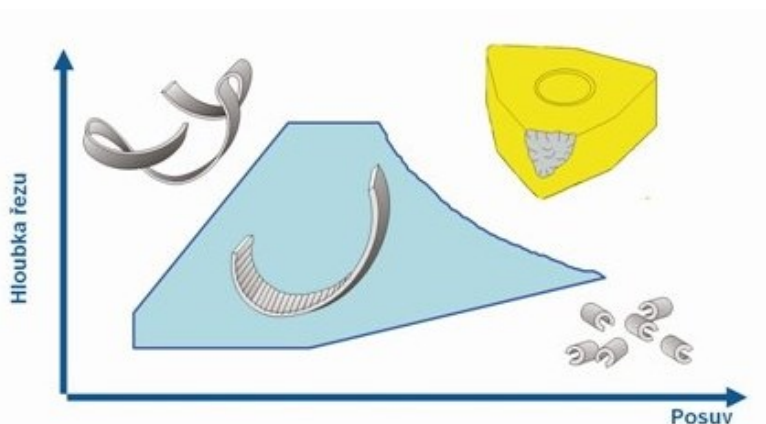
Otěr na hřbetě	Vrub na ostří nástroje	Nárůstek
		
Výmol na čele nástroje	Vylomení VBD	Hřebenové trhliny
		

- **Tvorba třísky**

Součástí geometrie řezného nástroje je i geometrie utvařeče, která má za úkol lámat a bezpečně odvádět třísky z místa řezu. Pro obrábění korozivzdorných ocelí je typická tvorba dlouhé smotané třísky, případně třísek nepravidelného tvaru, které jsou obtížně odstranitelné a mají výrazný vliv na silové zatížení břitu řezného nástroje. Podstatnou vlastností při utváření třísek je i tažnost materiálu, která způsobuje tvorbu delších třísek. Složitější kontrola utváření a odchodu třísky je zejména při obrábění austenitických a duplexních ocelí. Vysoce pevné materiály vyžadují

speciálně upravené břity spolu s nastavením vhodných řezných podmínek pro řezný proces. Vliv na tvorbu třísky mají také legující prvky chrom, nikl, kobalt, molybden a titan ve struktuře obráběného materiálu, které komplikují její utváření. To se projevuje zejména u operací zapichování, upichování a vnitřní soustružení. Na tvorbu třísky má podstatný také geometrie řezného nástroje. Větší úhel čela γ snižuje řezné síly a umožňuje tvorbu dlouhých třísek, které jsou nežádoucí. Vliv na tvorbu třísek má i zmíněný utvařec a jeho geometrie. Pro obrábění korozivzdorných austenitických ocelí je doporučeno volit pozitivní geometrii s negativní fazetkou pro zajištění větší pevnosti břitu.

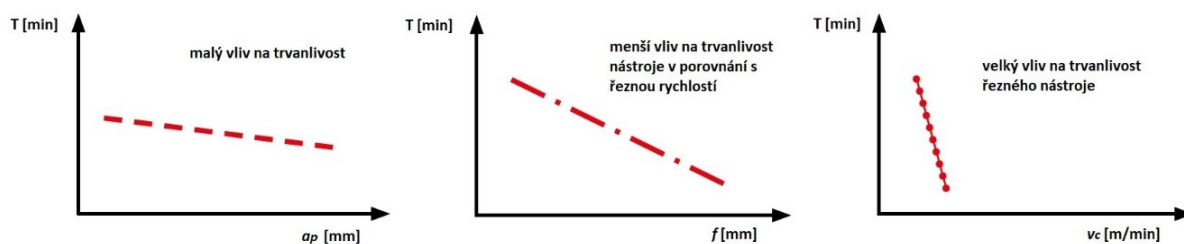
Při volbu řezných podmínek je obecně doporučeno použít větších hloubek řezu v kombinaci s hodnotou posuvu nástroje. Pokud by hodnota a_p byla malá, docházelo by k utváření čtvercových třísek, které přináší riziko poškození břitu nástroje. Z řezných podmínek je pro tvorbu třísky nejdůležitější hodnota posuvu. Vliv řezné rychlosti na tvorbu třísky nelze přesně specifikovat. Platí, že při nízkých posuvech a rostoucí řezné rychlosti bude docházet k tvorbě delších třísek. Pro správnou tvorbu třísky je obecně nutné nalézt rovnováhu mezi geometrií břitu a řeznými podmínkami, viz obr. 1.16.^{29, 30, 31}



Obr. 1.16 Tvorba třísky v závislosti na kombinaci posuvu a hloubky řezu¹⁵

• Volba řezných podmínek

Na základě experimentálních testů jsou potvrzeny malé rozsahy řezných podmínek pro obrábění korozivzdorných ocelí. Největší vliv na trvanlivost řezného nástroje má řezná rychlost, posuv a jako poslední hloubka řezu, viz obr. 1.17.



Obr. 1.17 Vliv řezných parametrů na trvanlivost řezného nástroje¹⁶

Pro efektivnější způsob odvodu tepla ze zóny řezání je nutné nastavit větší hloubku řezu a vysokou hodnotu posuvu s nižší řeznou rychlostí. Větší hloubka řezu eliminuje počet úběrů nutných k výrobě, ale způsobuje mechanické zatížení nástroje a zvýšení řezných sil při obrábění. Hloubka řezu by měla být větší než poloměru špičky břitové destičky, což umožňuje správné formování třísky. Malé hloubky řezu také produkují nadměrné množství tepla, které má vliv na vznik plastické deformace. Náchylnost deformačního zpevnění korozivzdorné oceli limituje maximální hodnotu posuvu nástroje. Nízké hodnoty způsobují opotřebení na hřbetě nástroje vznik nárůstků na jeho břitu. Příliš vysoký posuv řezného nástroje přináší vrubové opotřebení a horší kvalitu obrobeného povrchu. Nízké hodnoty řezné rychlosti vyvolávají u korozivzdorných ocelí vznik nárůstku na ostří nástroje z důvodu vysoké teploty v místě řezu. Naopak velmi vysoká řezná rychlost může vyvolat vznik plastické deformace, vrubové opotřebení a opotřebení na hřbetu nástroje.^{15, 29,}

30, 34

1.2.2 Řezný nástroj a volba jeho geometrie

Volba materiálu řezného nástroje a jeho geometrie je velmi důležitá. Během obrábění dochází k absorbování vysokého množství tepla do řezného nástroje. Z toho důvodu je nutné zvolit vhodný řezný materiál, např. slinutý karbid, u kterého je rozhodující velikost karbidových zrn a podíl kobaltu ve struktuře. Pevnost a tvrdost slinutého karbidu závisí na velikosti zrna. Řezný materiál musí být pro obrábění korozivzdorných ocelí vysoce houževnatý a povlaky musí mít nižší tendenci k adhezi.

Výrobci nástrojů vyvíjejí neustále nové typy vícevrstvých povlaků. Společnost Kyocera³⁹, japonský výrobce řezných nástrojů, přinesl na trh povlak, který je tvořen několika vrstvami, které jsou nanášeny na houževnatý substrát a snižují možnost prasknutí nebo vylomení břitu nástroje. První vrstva je na bázi TiN, zajišťuje chemickou stálost a zvyšuje odolnost proti oxidaci. Další vrstva na bázi speciálního Al_2O_3 se vyznačuje vysokou otěruvzdorností zejména při HSC obrábění a snižuje chemickou difúzi při obrábění korozivzdorných ocelí. Povlak TiCN je velmi tvrdý povlak, který má zamezit vylamování břitu. V posledním kroku je na samotném houževnatém substrátu nanášena odolná vrstva speciálního povlaku pro zvýšení adheze celého vrstveného systému.³⁹

Na základě velikosti úhlu břitu je možné geometrii řezných nástrojů rozdělit na negativní a pozitivní. Pozitivní geometrie je určena pro obrábění měkkých a tvárných materiálů jako jsou hliníkové slitiny. Negativní geometrie je nutno zvolit pro obrábění tvrdších materiálů, kde vzniká velké mechanické zatížení břitu nástroje a kde je vyžadována vyšší relativní pevnost břitu řezného nástroje.

Řezný nástroj pro obrábění korozivzdorných ocelí vyžaduje ostrou geometrii s pozitivním úhlem čela a zesíleným břit za pomoci negativní fazetky po celé délce ostří nástroje pro zajištění lepší řezivosti nástroje. Pro operace soustružení je vhodné volit pozitivní T – fazetku, aby se předešlo tvorbě nárůstku a vzniku vyšší řezných sil. Vhodné je také volit větší poloměr špičky nástroje. Vysoká

odolnost proti opotřebení nástroje je dána vyšším obsahem karbidu wolframu v substrátu.^{27, 28, 30, 37, 38, 39}

1.2.3 Obrábění korozivzdorných ocelí – přehled

Obrábění korozivzdorných ocelí je v současné době velmi diskutované téma^{29 - 46}, kdy je hodnocen vliv procesních parametrů, posouzení jejich obrobitelnosti, trvanlivost vybraných řezných nástrojů a vznik opotřebení, vliv mikrostruktury jednotlivých typů korozivzdorných ocelí, chování povlaků při obrábění hlavně austenitických ocelí. Literatura *Stainless steel for machining*³¹ – Designer handbook popisuje vybrané typy ocelí z hlediska mikrostruktury a aplikačního použití. Společnost Euro Inox²⁹ vydala příručku pod názvem *Vlastnosti korozivzdorných ocelí*, která hodnotí korozivzdorné oceli z pohledu mikrostruktury se zaměřením na odolnost proti korozi. Autor J. P. Davim⁴⁷ ve své knize *Machinability of Advanced Materials* věnuje pozornost obrobitelnosti a jejímu vyhodnocení při obrábění progresivních materiálů. Kolektiv autorů M. Kaladhar et al.⁴⁸ ve svém příspěvku *Machining of Austenitic Stainless Steels* popisuje austenitické oceli od jejich vlastností, přes metalurgii až po obrábění a zaměřuje se na problémy, které se mohou vyskytovat při jejich opracování. V tomto příspěvku je také zpracována podrobná rešerše dalších autorů věnujících se problematice obrábění korozivzdorných ocelí. V současné literatuře od H. A. Youssefa³² *Machining of Stainless Steel and Super alloys – traditional and nontraditional techniques* jsou představeny nejdůležitější fakta týkající se korozivzdorných ocelí a superslitin. Tekiner a Yesilyurt⁴⁹ se zabývali hodnocením vybraných mechanismů opotřebení a kvality obrobeného povrchu korozivzdorné oceli po obrábění. Muñoz-Sánchez⁵⁰ et al. analyzovali vliv opotřebení řezného nástroje na integritu povrchu austenitické oceli AISI 316L. Několik autorů se také zabývalo hodnocením zbytkového napětí indikovaného v obrobeném povrchu standardní austenitické oceli AISI 316L a v oceli s vylepšenými vlastnostmi. V příspěvku Endrina⁵¹ et al. byly hodnoceny fyzikální vlastnosti PVD povlaku s ohledem na životnost řezného nástroje při obrábění AISI 316L. Korkut⁵² et al. stanovili optimální řezné podmínky pro obrábění austenitické oceli a hodnotili vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu. Závěrem stanovili závislost mezi opotřebením řezného nástroje, drsností povrchu a tvorbou třísky za jednotlivých řezných rychlostí. Yontar⁵³ et al. ve svých výzkumech stanovili závěry pro hodnocení vlivu řezných parametrů na drsnost povrchu, obrobitelnost a životnost řezného nástroje pro korozivzdornou ocel. Výzkumníci Alabdullah et al.⁵⁴ se zabývali výzkumem obrábění austenitické korozivzdorné oceli s ohledem na vliv geometrie řezného nástroje a na obrobitelnost materiálu. Potvrdili výskyt abrazivního opotřebení na ostří nástroje s viditelnou tvorbou nárustkem, která způsobuje zhoršenou kvalitu obráběného povrchu.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je analýza současného stavu procesu upichování korozivzdorných ocelí se zaměřením na obrobiteľnost, vhodné řezné nástroje a vývoj jejich opotřebení typické při obrábění austenitické korozivzdorné oceli. Teoretické poznatky budou použity k vyhodnocení experimentální činnosti, která bude navržena na základě metody Plánovaných experimentů – plně faktoriálního plánu 2^k . Na základě funkčních testů budou navrženy řezné podmínky dolní a horní hranice pro stanovení hodnoty sledované veličiny počtu upíchnutých kroužků Q . Získané výsledky budou vyhodnoceny na základě statistické metody ANOVA s využitím statistického softwaru MINITAB 18.

Materiálem obrobku byla zvolena austenitická korozivzdorná ocel s označením dle W. Nr. 1.4404 (AISI 316L), která je často používána pro výrobu součástí v leteckém, chemickém a energetickém průmyslu. Pro realizaci experimentu byly pracovníky vývoje společnosti DORMER Pramet s.r.o. navrženy a dodány prototypové upichovací dvoubřité řezné nástroje vyrobené ze slinutého karbidu s nanesenou tenkou vrstvou PVD povlaku. Tyto VBD byly vyrobeny s různým poloměrem zaoblení ostří a mikrogeometrií povrchu. Experimentálně navržený proces upichování bude zhodnocen z hlediska statistické významnosti jednotlivých členů spolu s regresní analýzou a interpretací účinků jednotlivých členů v modelu. Současně bude stanovena i optimalizace odezvy pro zadané parametry upichování. Celý proces upichování bude sledován a hodnocen také z hlediska vývoje opotřebení řezných nástrojů, utváření třísky a mikrogeometrie obrobeného povrchu. Výsledky budou prezentovány pro vědu a praxi a budou stanovena doporučení pro další výzkum v oblasti upichování korozivzdorných ocelí.

DÍLČÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Provést analýzu současného stavu procesu upichování.
- Provést analýzu obrábění korozivzdorných ocelí.
- Navrhnout experimentální činnost s využitím metody Plánovaných experimentů – plně faktoriálního návrhu s dvěma úrovněmi.
- Ověřit vstupní podmínky upichování na základě funkčních testů.
- Experimentálně ověřit limitních podmínky dle metody Plánovaných experimentů pro zadané prototypové řezné nástroje.
- Vyhodnotit proces upichování z hlediska statistické významnosti členů modelu.
- Vyhodnotit proces upichování, vývoj a mechanismy opotřebení, utváření třísky a mikrogeometrii obrobeného povrchu.
- Stanovit závěry, definovat přínosy pro vědu, praxi a navrhnout doporučení pro další výzkum v oblasti upichování korozivzdorných ocelí.

3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI OBRÁBĚNÍ

3.1 Obráběný materiál austenitická ocel dle W. Nr. 1.4404

Pro experimentální činnost disertační práce byla zvolena austenitická korozivzdorná ocel s označením dle W.Nr. 1.4404 (AISI 316L). Jedná se o chrom-nikl-molybdenovou ocel, která je běžně používanou korozivzdornou ocelí ve strojírenství, zdravotnictví, chemickém a potravinářském průmyslu. Austenitická korozivzdorná ocel se vyznačuje vysokou odolností proti korozi vlivem legujících prvků ve struktuře, konkrétně díky množství chromu min. 10,5 % a hodnotě molybdenu. Chrom má schopnost vytvářet na povrchu materiálu tenkou vrstvu oxidů, která zde přetrvává i po použití technologií třískového obrábění. Tento materiál je také velmi dobře zpracovatelný při tažení, lisování a ohýbání, má dobrou svařitelnost, ale je obtížně obrobitelný. Austenitické oceli jako jediné ze skupiny korozivzdorných ocelí jsou nemagnetické. Tato ocel nemůže být zpevňována kalením.^{41, 42, 44,}

Značení podle standardů: W.Nr. 1.4404, AISI / ASTM 316L, EN X2CrNiMo 17-12-2, ČSN 17 349.³⁰

- Chemické složení a mechanické vlastnosti austenitické oceli W. Nr. 1.4404**

V tabulce 3.1 je uvedeno chemické složení austenitické oceli W. Nr. 1.4404. Austenitické oceli mají nízké pevnostní hodnoty a nízký poměr smluvní meze kluzu k mezi pevnosti. Pro zvýšení pevnosti je ocel často dolegována dusíkem okolo 0,3 %. Vyšší hodnota manganu může také dopomoci ke zvýšení pevnosti, avšak na úkor částečného snížení odolnosti proti celkové korozi materiálu. V tabulce 3.2 jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli W. Nr. 1.4404.⁵⁵

Tab. 3.1 Chemické složení austenitické oceli W. Nr. 1.4404 v hm %⁵⁵

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
0,014	1,72	0,68	0,03	0,028	16,62	2,04	10,01	0,08

Tab. 3.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti austenitické oceli W. Nr. 1.4404⁵⁵

R _m [MPa]	R _{p0,2} [Mpa]	Tvrdost [HB]	A5 [%]	Z [%]
577	265	217	58	67
ρ [g·cm ³]	E [GPa]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] (100° C)	T [°C]	
7,90	200	14,6	1 440	

- Obrábění a obrobitelnost austenitické oceli W. Nr. 1.4404**

Základní matrice oceli je tvořena austenitem – intersticiálním tuhým roztokem uhlíku v železe γ^{Fe}, který má plošně středěnou kubickou mřížku (fcc). Austenitická struktura vzniká při dostatečném obsahu austenitotvorných prvků – nikl, mangan a dusík. Základním typem je chrom-niklová austenitická ocel s 18 % chromu a 9 % niklu. Pro získání lepších mechanických vlastností a zvýšení

korozní odolnosti se ocel dolegovává. Pro zachování austenitické struktury je nutné zachovat správný poměr feritu a austenitu.^{32, 33, 41}

Vliv legujících prvků na austenitickou korozivzdornou ocel:³²

- *korozní odolnost* – chrom, molybden, měď, křemík a nikl,
- *mechanické vlastnosti* – dusík,
- *obrobitelnost* – síra, olovo, měď, fosfor, selen,
- *odolnost proti bodové a štěrbinové korozi* – molybden, křemík a dusík,
- *odolnost proti mezikrystalové korozi* – titan a niob.

Vlivem působení teploty a tlaku dochází ke změně struktury austenitu na tvrdý martenzit. Tato změna se projevuje zpevněním za studena, kdy v povrchových vrstvách obrobku vznikají oblasti s extrémně vysokou tvrdostí. To má za následek zhoršenou obrobitelnost materiálu a ztížené podmínky během obrábění. Austenitické oceli jsou velmi dobře svařitelné a značně houževnaté i za nízkých teplot.

Přítomností tvrdých karbidů ve struktuře korozivzdorných ocelí je obrábění obtížné, proto je důležité sledovat všechny projevy procesu obrábění (opotřebení řezného nástroje, velikost řezného odporu). Tvrdá povrchová vrstva obrobku urychluje opotřebení řezného nástroje, což může mít dopad na zhoršenou kvalitu a přesnost obrobeného povrchu. Charakteristickým opotřebením je tvorba vrubu vlivem vysoké teploty v místě řezu a tvorbou dlouhých třísek. Během obrábění dochází také k adheznímu opotřebení, a tím k tvorbě nárůstku (BUE), který vzniká postupným navařováním obrobeného materiálu na břitu řezného nástroje, zvláště při obrábění nástrojem ze slinutého karbidu.⁵⁵

Tvrzený stav oceli může způsobit odlupování povlaku a vytrhávání substrátu z ostří nástroje. Dalším problémem spojeným s obrobitelností těchto ocelí je výskyt vměstků v základním materiálu obrobku. Oproti makrovměstkům, které se nevyskytují u korozivzdorných ocelí, jsou nežádoucí mikrovměstky přítomny ve struktuře materiálu. Jedná se zejména o vměstky na bázi oxidu hliníku a karbidu titanu, které se vyznačují svou tvrdostí a vysokou abrazivností. Méně podstatné, přesto však nezanedbatelné, jsou vměstky oxidů železa a manganu, které snižují obrobitelnost materiálu.

15, 28, 29, 40

Během obrábění oceli je nutné také klást na důraz na volbu řezných podmínek. Obecně jsou rozsahy řezných podmínek pro obrábění austenitické korozivzdorné oceli nižší než pro běžné uhlíkové oceli. Jejich správná volba je důležitá z pohledu dosažené trvanlivosti řezného nástroje, přičemž vyšší hodnoty způsobují abrazivní opotřebení na hřbetě nástroje a s vyšší teplotou v místě řezu dochází k plastické deformaci řezného materiálu. V opačném případě dochází k tvorbě nárůstku. Doporučovány jsou hodnoty větší hloubky řezu spolu s posuvem, což má pozitivní dopad na odvod

tepla z místa řezu. Břit nástroje není tak tepelně namáhán. Lepších výsledků procesu obrábění je také dosaženo za použití vysokotlakého chlazení s procesním médiem s vyšší koncentrací oleje ve vodní emulzi (8 – 9 %). Dostatečným tlakem je emulze přivedena do zóny řezání, což zajišťuje vyšší efektivitu obrábění. Současný trh nabízí chladicí systémy – Seco Jetstream Tooling pro účinnější chlazení procesu obrábění.²¹

V neposlední řadě je důležité se zaměřit na volbu řezného nástroje. Pro maximální trvanlivost nástroje je nutné zajistit vysokou odolnost slinutého karbidu a naneseného povlaku. I přes vysoké mechanické a tepelné zatížení břitu je běžně doporučeno použít nástroj ze slinutého karbidu s ostrou geometrií zesílenou pomocí negativní fazetky a vhodným utvařečem. Bližší informace o volbě řezného nástroje pro obrábění korozivzdorných ocelí byly uvedeny v kapitole 1.2.2.⁵⁶

3.2 Volba obráběcího stroje

Austenitické korozivzdorné oceli patří do skupiny těžkoobrobitelných materiálů, proto je při jejich opracování vyžadována vysoká tuhost obráběcího stroje. Pro experimentální testování v rámci disertační práce byl vybrán horizontální CNC soustruh DMG MORI s označením NLX2500MC/700, viz obr. 3.1. Obráběcí stroj je opatřen řídicím systémem Mitsubishi M730BM a má požadovaný rozsah otáček a potřebný výkon pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Vybavení stroje umožňuje upnutí až 12 řezných nástrojů včetně 4 rotačních. Maximální obráběcí průměr obrobku je 366 mm s plynulou změnou otáček vřetena. CNC soustruh je majetkem Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie na Fakultě strojní VŠB – TU Ostrava.⁵⁷



Obr. 3.1 CNC soustruh NLX2500MC/700⁵⁷

3.3 Prototypové řezné nástroje a jejich (mikro)geometrie

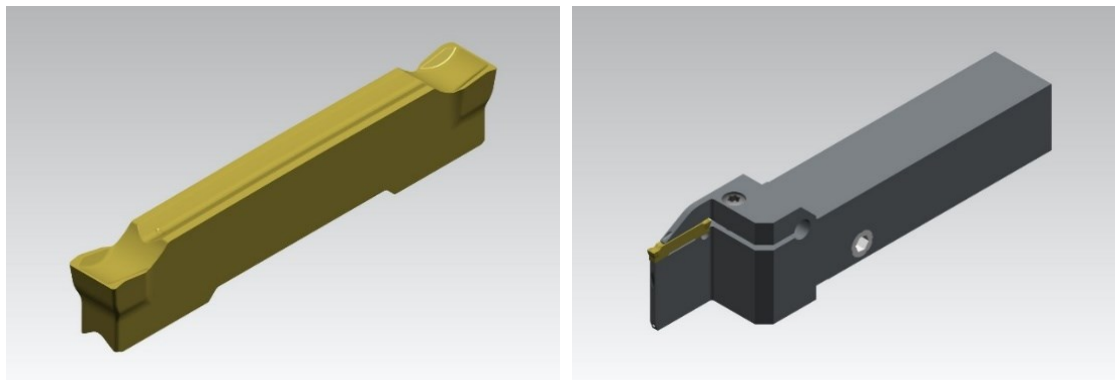
- **Makrogeometrie vyměnitelných břitových destiček**

Při vývoji společnosti DORMER Pramet s.r.o. byly navrženy pro experimentální činnost povlakované vyměnitelné břitové destičky s označením XYZ*. Řezné nástroje byly vyrobeny ze slinutého karbidu vhodného pro upichování materiálů skupiny materiálů M dle ISO 513: 2002.⁵⁸ Jedná se o prototypové řezné nástroje o délce 25 mm s dvěma břity, šířkou destičky $w = 3$ mm a nástrojovým poloměrem špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm. Destičky jsou vyrobeny s utvařecem a s negativní fazetkou šířky $x = 0,1$ mm pod úhlem -12° , viz obr. 3.2a. Pro upnutí byl použit levý nožový držák kvadratického průřezu 25 x 25 mm s vyložení nástroje $T_{MAX} = 24$ mm a s vnitřním přívodem chladicí kapaliny, viz obr. 3.2b.

*Pozn.: Společnost si nepřeje zveřejnění oficiálního značení řezného nástroje a jeho povlaku.

Makrogeometrie prototypových VBD:

- úhel hřbetu v rovině ortogonální $\alpha_o = 7^\circ$,
- úhel čela v rovině ortogonální $\gamma_o = 25^\circ$,
- šířka fazetky $x = 0,1$ mm
- úhel sklonu fazetky -12° ,
- poloměr špičky $r_\epsilon = 0,2$ mm,
- radius žlábků $R = 3$ mm,
- sklon žeber 4° .



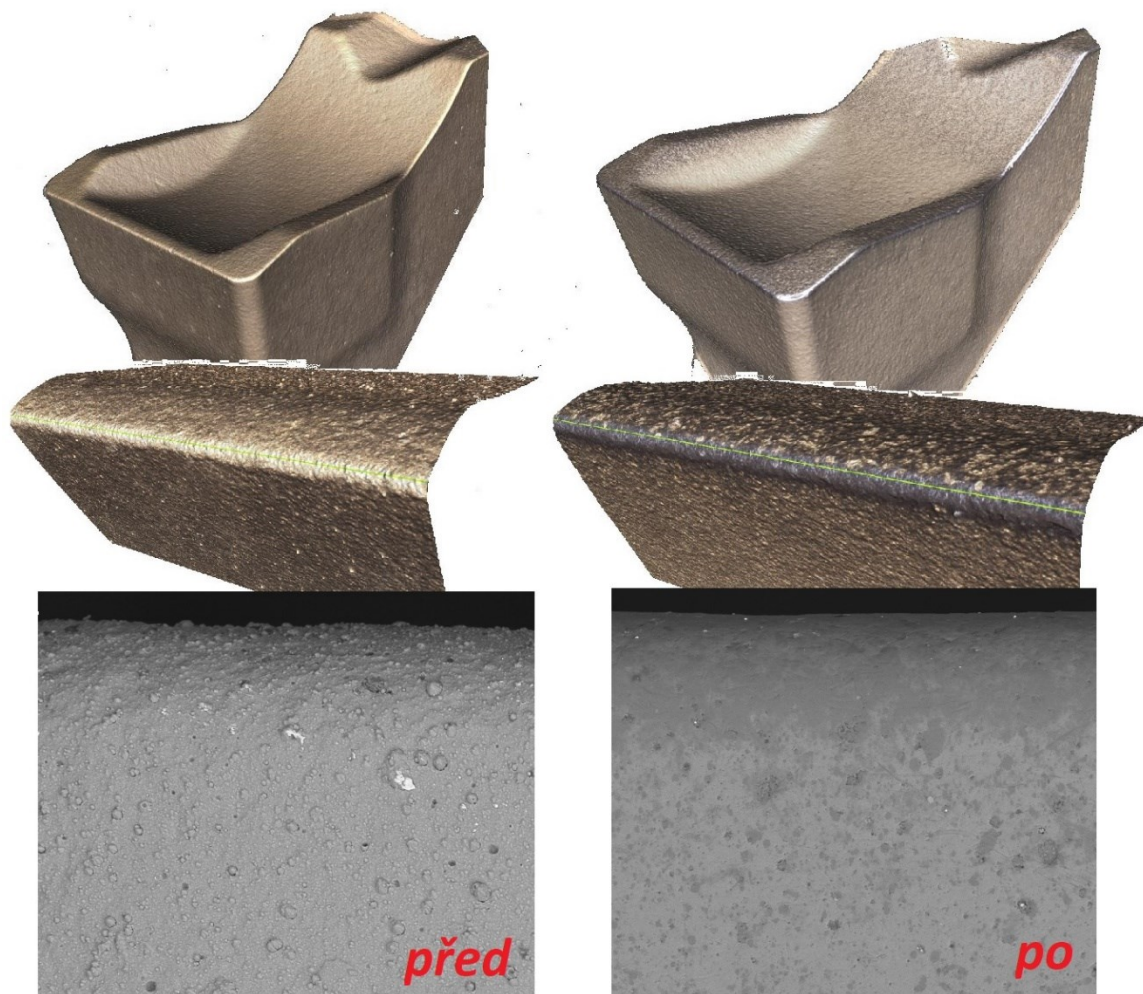
Obr. 3.2 Použitý řezný nástroj

a) – vyměnitelná břitová destička; b) – nožový držák průřezu 25x25 mm

- **Mikrogeometrie vyměnitelných břitových destiček**

Při experimentálním testování byly použity dvě varianty vyměnitelných břitových destiček s dvěma různými poloměry zaoblení ostří r_n a úpravou povrchu. U jedné z variant byla použita mechanická metoda úpravy povrchu – leštění. Pracovní velikost poloměru zaoblení ostří nástroje byla zvolena $r_n = (40 \pm 7) \mu\text{m}$ a $r_n = (25 \pm 7) \mu\text{m}$.

Cílem mechanických úprav je odstranění nepřesností za účelem dosažení požadované mikrogeometrie a mikrotopografie povrchu bříty nástroje, což výrazně ovlivňuje trvanlivost řezného nástroje. Principem mechanických metod je působení abrazivního účinku pracovního média na řezný nástroj po předem stanovenou dobu. Konkrétně u technologie leštění je ostří řezného nástroje upraveno za pomoci plochého kartáče s měkkými polymerními vlákny, na které je nanесena brusná pasta s diamantovými částicemi. Velikost zaoblení a drsnost povrchu se odvíjí od hrubosti vláken kartáče a velikosti zmíněných brusných částic.²⁶



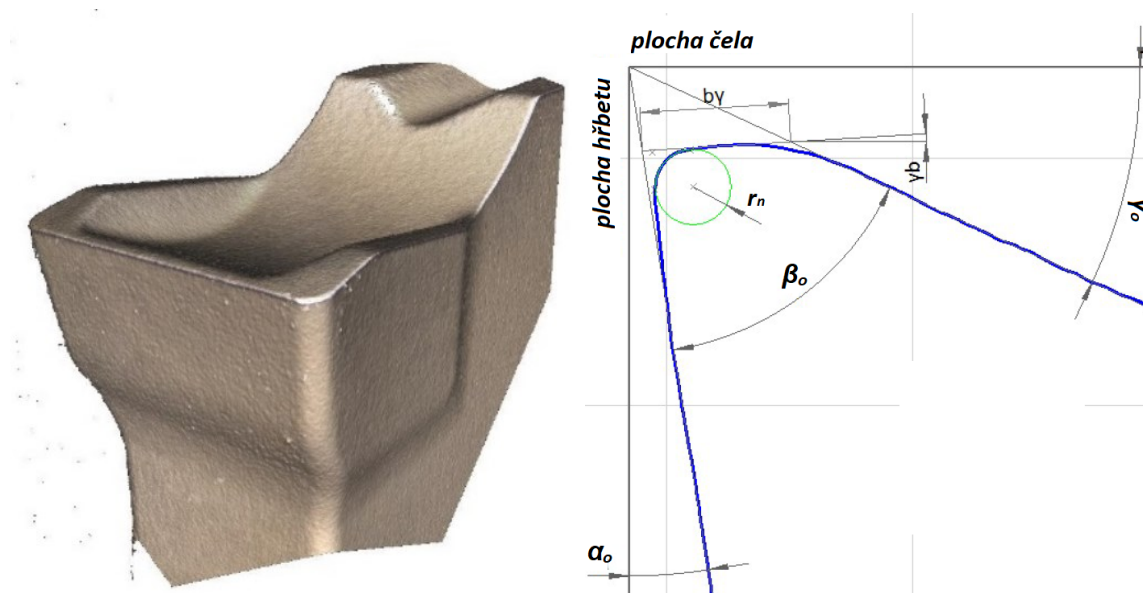
Obr. 3.3 Ostří nástroje před a po mechanické úpravě povrchu

Na obrázku 3.3 je 2 000x zvětšený povrch hlavního ostří řezného nástroje před a po úpravě povrchu. Jde vidět, že po úpravě je leštěný povrch zbaven mikročástic a nerovností vyskytujících se na PVD povlaku. U varianty VBD s mechanickou úpravou povrchu lze v některých místech sledovat nežádoucí ovlivnění povrchu naneseného povlaku.

Pro oba poloměry zaoblení ostří r_n byla provedena kontrola geometrie řezných nástrojů pomocí optického mikroskopu Alicona Infinite Focus G5. V tabulce 3.3 jsou uvedeny vybrané parametry geometrie a mikrogeometrie povrchu řezného nástroje, viz obr. 3.4.

Tab. 3.3 Náměry testovaných VBD

VBD XYZ			
Parametry		VBD 1	VBD 2
Poloměr zaoblení r_n		32,94 μm	26,48 μm
Úhel hřbetu α_o		8,06°	8,97°
Úhel čela γ_o		25,17°	24,43°
Úhel břitu β_o		56,77°	56,21°
K – faktor		1,00	0,95
Velikost zaoblení na čelní ploše S_y		36,62 μm	30,68 μm
Velikost zaoblení na hřbetní ploše S_α		35,60 μm	32,17 μm
Neleštěná varianta		Leštěná varianta	
Ra	0,49 μm	Ra	0,28 μm
Rz	2,49 μm	Rz	1,16 μm



Obr. 3.4 Břit upichovací destičky

- Charakteristika použitého slinutého karbidu

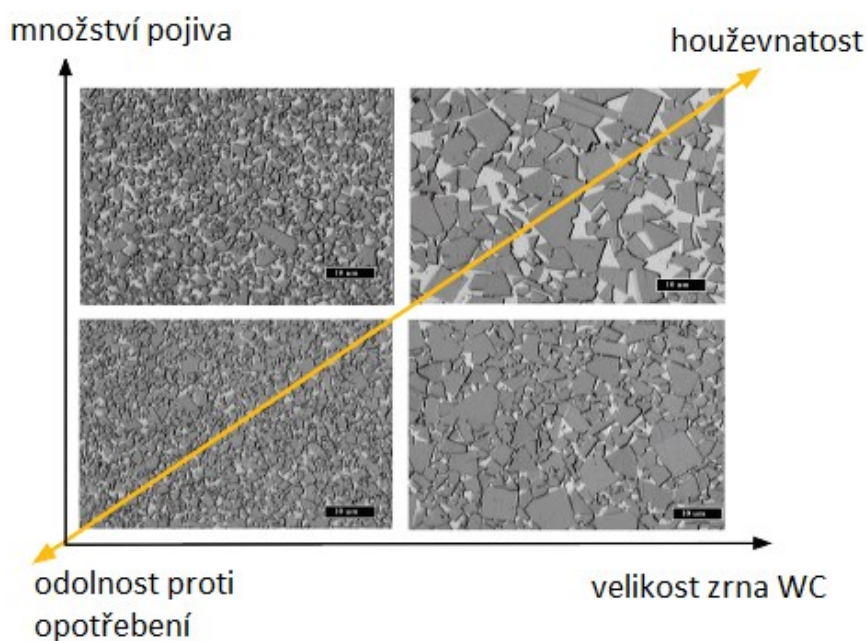
Slinutý karbid vyměnitelných břitových destiček je tvořen fází alfa – složka tvrdého karbidu wolframu ($WC \sim 90 \%$) – šedá oblast, fází beta pojivem kobaltu ($Co \sim 10 \%$) – bílá oblast a případně gama fází, což jsou příměsi $Cr_3C_2 < 0,5\%$, viz obr. 3.5. Výsledné vlastnosti slinutého karbidu jsou ovlivněny jeho složením a strukturou. Menší odchýlení od ideálního obsahu uhlíku má za následek tvorbu grafitu nebo ternárních (tříprvkových) sloučenin. Tyto fáze pak způsobují degradaci mechanických vlastností a ovlivňují funkci rezného nástroje. Použitý substrát rezných nástrojů má strukturu s velikostí zrna 1 – 2 μm . Tato struktura má potlačený sklon ke křehkému

poškození. Má tedy vyšší pevnost, aniž by došlo ke snížení její tvrdosti a lze na ní tak vybrousit velmi ostré prvky. Tyto karbidy se také vyznačují vysokou odolností proti opotřebení.^{59, 60}



Obr. 3.5 Substrát vyměnitelných břitových destiček

Množství kobaltu obsažené ve struktuře slinutého karbidu ovlivňuje všechny fyzikální a mechanické vlastnosti slinutého karbidu bez ohledu na jeho typ. Pokud množství kobaltu roste, dochází k poklesu tvrdosti, měrné hmotnosti, relativní odolnosti proti opotřebení, tepelné vodivosti, naopak roste pevnost v ohybu, vrubová houževnatost a únavová pevnost karbidu, viz obr. 3.6.^{59, 61}



Obr. 3.6 Závislost množství pojiva a velikosti zrna WC na vlastnosti SK¹⁶

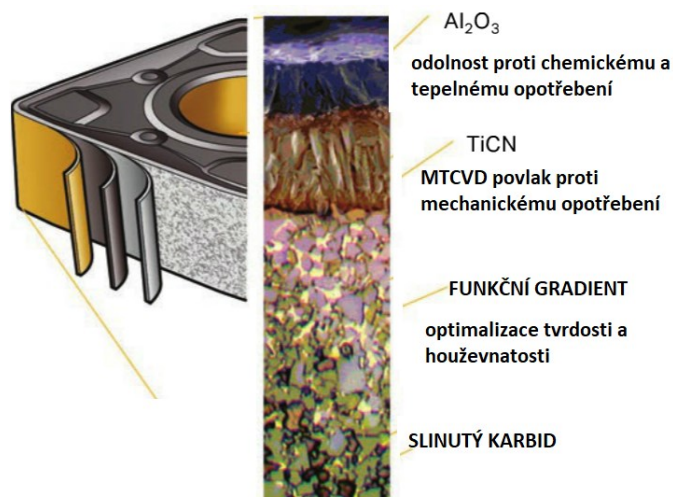
* Gradienty se využívají pro získání kombinace zvýšené odolnosti proti plastické deformaci a houževnatosti břitu. Kubické karbonitridy koncentrované v blízkosti břitu zvyšují tvrdost za vysokých teplot v místě, kde je třeba. Ve větší vzdálenosti od břitu brání zvýšené množství pojiva ve struktuře tvořené karbidy wolframu vzniku trhlin a lomů v důsledku zasekávání třísek během procesu obrábění. Vlastnosti použitého substrátu slinutého karbidu jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tab. 3.4 Složení a vlastnosti slinutého karbidu WC – Co (interní podklady společnosti DORMER Pramet s.r.o)

Složení a vlastnosti SK WC – Co (90; 10 %)			
Měrná hmotnost ρ [g·cm ⁻³]	Tloušťka gradientu* t [μm]	Pevnost v ohybu σ_b [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
14,48 ± 0,08	0	1 550 – 1 950	585
Měrná tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tvrdost [HV]		Velikost zrna [μm]
71	1 555		1-2

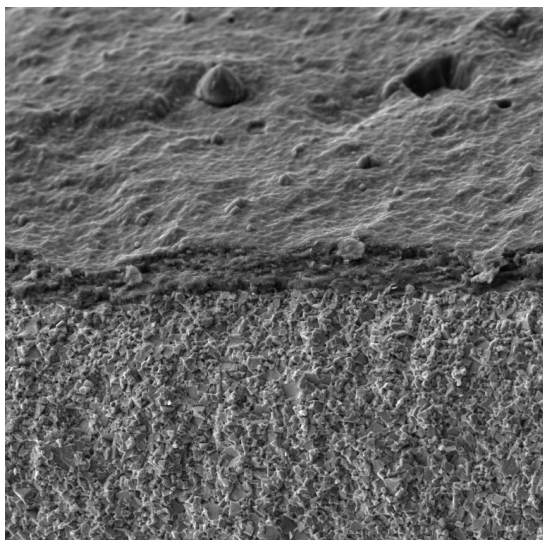
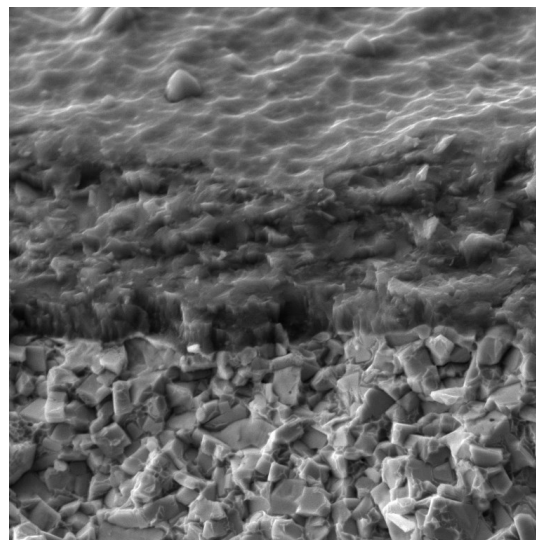
- **Charakteristika použitého povlaku**

Povlakování slinutých karbidů ovlivňuje řezivost a trvanlivost řezných nástrojů. V dnešní době se stále více objevují vícevrstvé povlaky nanesené pomocí CVD nebo PVD technologie. Nanesený povlak kopíruje tvar nástroje a díky adhezním silám se udržuje na povrchu. Technologie povlakování slinutých karbidů vylepšuje mechanické a fyzikální vlastnosti SK, které jsou ovlivněny druhem povlaku, jeho tloušťkou, metodou povlakování a typem základního substrátu VBD. Pro funkci povlaku je důležitá i jeho drsnost povrchu a koeficient tření.

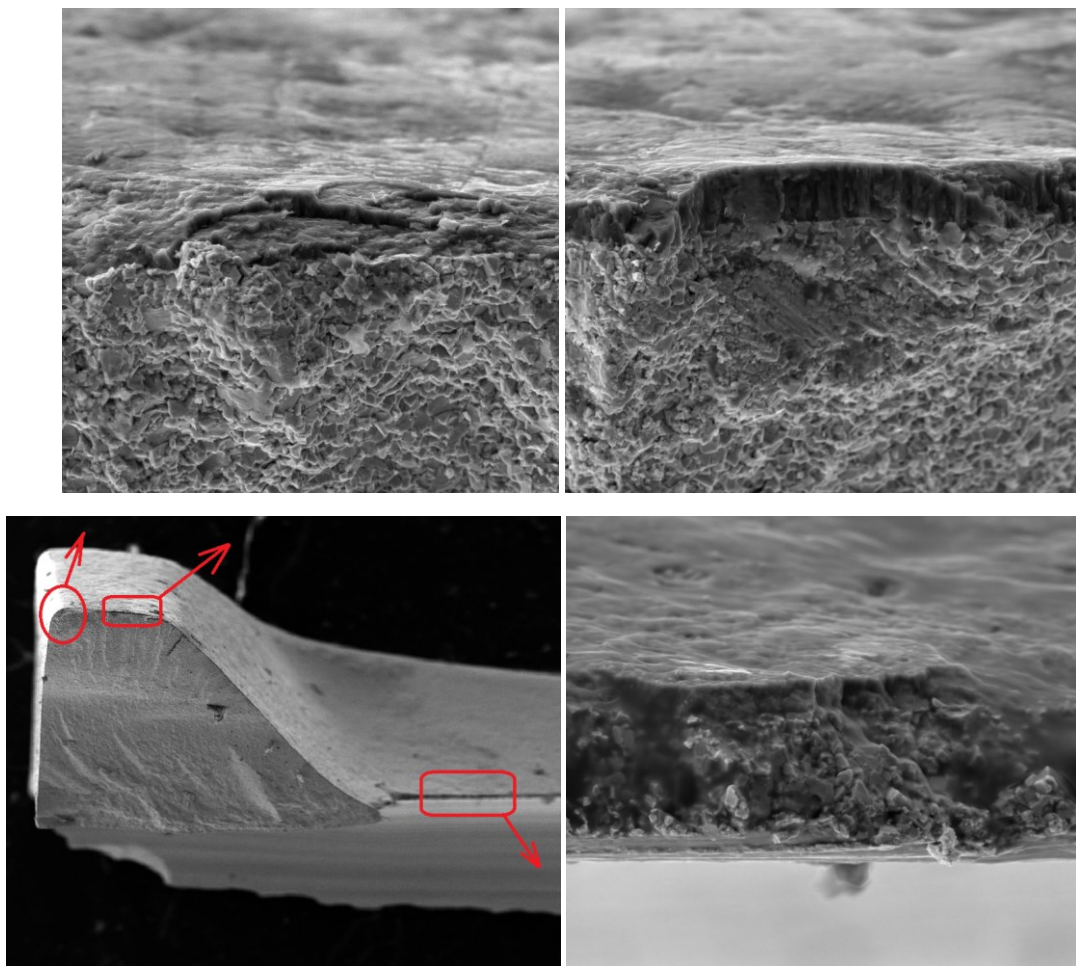
Obr. 3.7 Vlastnosti jednotlivých vrstev povlaku ¹⁶

Samotná odolnost povlaku závisí na jeho typu. Mezi základní typy povlaků patří Al_2O_3 , který se vyznačuje vynikající termomechanickou stabilitou při vyšších řezných rychlostech, kdy vzniká plastická deformace. Pokud dojde ke snížení řezné rychlosti, začne převládat abrazivní opotřebení. Zde nastupuje povlak TiC, který je tvrdší než předchozí varianta. Tloušťka povlaku je také důležitým faktorem. Pokud je povlak příliš tlustý, dochází ke snadnějšímu odlupování. Zejména při frézování, kde je nástroj silně mechanicky zatěžován, je doporučeno použití tenčích povlaků (PVD). Přítomnost povlaku zajišťuje také menší řezné síly, teploty, koeficient tření, obecně eliminuje výskyt opotřebení a má vyšší tvrdost v porovnání se slinutými karbidy bez povlaku. Skladba moderního povlaku je zobrazena na obrázku 3.7. ^{16, 59, 61, 62}

Testované vyměnitelné břitové destičky byly povlakovány PVD technologií s povlakem pro oblast použití *P25 – P40* a *M20 – M35* o tloušťce 2 μm . PVD povlaky jsou v porovnání s CVD houževnatější a otěruvzdornější, čímž přispívají k vyšší životnosti řezného nástroje. Jsou používány v kombinaci s ultrajemnozrnnou strukturou na nástroje s ostrou geometrií. Jejich odolnost proti vysokým teplotám umožňuje PVD povlaky využívat pro vysokorychlostní obrábění (HSC) a obrábění tvrdých a houževnatých materiálů. Během procesu obrábění vzniká na povrchu tenká vrstva Al_2O_3 , díky které dochází ke snížení tření, zvýšení difúzní odolnosti a zlepšení řezných vlastností nástroje. Na obrázku 3.8 je zobrazen vzhled povlaku na lomové ploše pro použitý povlak VBD.

**Zvětšeno 5 000x****Zvětšeno 20 000x***Obr. 3.8 Použitý PVD povlak na lomové ploše*

Na obrázku 3.9 je zobrazen zvětšený řez VBD, kde je názorně vidět přechod mezi povlakem a substrátem u leštěné varianty při zvětšení 10 000x. Pro oblast u zaoblení břitu jde vidět, že vlivem mechanické úpravy povrchu dochází k velkému otěru povlaku a jeho tloušťka je zde výrazně tenčí.



Obr. 3.9 Úběr povlaku po aplikaci mechanické úpravy povrchu (10 000x zvětšeno)

4 PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU V OBLASTI TESTOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Každý výrobní proces nebo experimentální činnost musí být podložena konkrétním plánem, který charakterizuje a definuje podmínky pro jejich zpracování. Metody plánovaných experimentů pracují na principu statistických metod, studia společných efektů několika proměnných vlivů a určení kombinace hodnot faktorů pro stanovení významných a bezvýznamných závěrů. Navrhování experimentu je přístup pro efektivní a účinné využití vztahu příčiny a následku mezi více faktory (X) procesu a výstupní či sledovanou proměnnou procesu (Y). Důležité je, aby návrh experimentu byl co nejmenší, ale podání informací o sledovaných veličinách co nejpodrobnější.^{63, 64, 79, 80}

Původcem metody je Sir Ronald Fischer, anglický matematik, který spolu s kolegy formuloval základní principy *DOE* na základě zadaného úkolu. Široké využití Metody plánovaných experimentů *DOE* je možné sledovat zejména v Japonsku a ostatních nově industrializovaných asijských zemích. Další aplikace *DOE* jsou zaznamenány ve Spojených státech. Evropské země jsou s využíváním těchto metod podstatně pozadu. První a úspěšná aplikace *DOE* byla zavedena do výroby polovodičů.

Vyhodnocení *DOE* lze jednoduše a účinně navrhnout a vyhodnotit pomocí softwaru Microsoft Excel. Pro využití metody odezvoových ploch je nutno použít statistické softwaru typu MINITAB. Vyhodnocení a získání dat je získáno na základě metody ANOVA. Genichi Taguchi přispěl k rozšíření a popularizaci *DOE* v průmyslové praxi, proto je velmi často zmiňována tzv. Taguchiho metodách. Jeho metody jsou však statisticky sporné a málo efektivní, proto se v dnešní době od nich postupně odstupuje.

Metody plánovaných experimentů zajišťují zvýšení výtěžnosti, snížení variability, lepší centrování procesu, zkrácení zaváděcího času, redukci nákladů, aj. *DOE* hraje roli i při vývoji nových produktů, přičemž dovede určit klíčové parametry, stanovit alternativy procesu, optimalizaci procesu nebo srovnání různých konfigurací ve výrobě.^{65, 81}

Obecně jsou metody plánovaných experimentů popsány v nespočtu zejména zahraničních literatur, které jasně definují podstatu jednotlivých metod, návrhů, jejich využití a vyhodnocení. V publikacích jsou také vysvětleny pojmy týkající se *DOE* a jeho vyhodnocení. Jsou zde také popsány jednotlivé metody, jako je ANOVA a Taguchiho metody, které objasňují celý proces a jeho optimalizaci.^{63 – 68}

Metody plánovaného experimentu jsou velmi často využívány v průmyslové praxi, např. v chemickém a strojírenském průmyslu. Metodou plánovaného experimentu se zabývali autoři při vyhodnocení kvality pájených spojů z hlediska termomechanického namáhání pomocí metody MKP. Aplikací Taguchiho metody pro stanovení drsnosti a kruhovitosti povrchu během vrtání korozivzdorné oceli dle AISI 316 se zabývali autoři M. P. Yadav et al.⁶⁹, kteří zde hodnotili vliv řezných podmínek na drsnost povrchu. Dittrich et al.⁷⁰ využili metodu *DOE* pro analýzu procesu

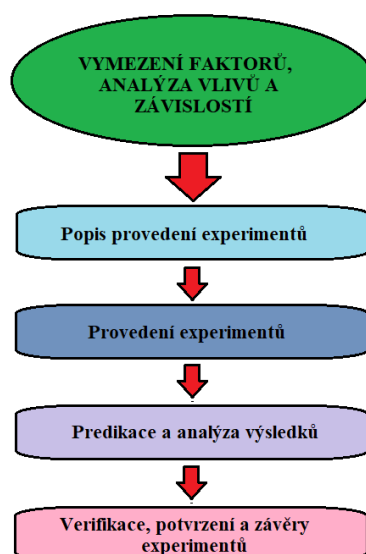
působení vodního paprsku na keramické povrchy. Opět zde byla vyhodnocena drsnost povrchu při různých vstupních parametrech laseru. Metoda Plánovaných experimentů byla využita také pro výzkum a zlepšení procesu řezání vysokovýkonným laserem pro optimalizaci procesu suchého obrábění s dokončovacími frézami s ohledem na výslednou kvalitu povrchu. V závislosti na volbě řezných podmínek bylo docíleno zvýšení trvanlivosti fréz a lepší drsnosti povrchu.⁷¹ I přes nevhodně zvolené vstupní faktory lze správně zvolenou metodou *DOE* dostatečně analyzovat jakýkoliv proces a navrhnout jeho optimalizaci.

4.1 Základní pojmy v oblasti plánování experimentů

Experimentem se rozumí test nebo série testů (pokusů či měření), která jsou provedena za účelem zvýšení kvality produktu nebo procesu, případně zvýšení jejich efektivity. Souhrn těchto pokusů je rozdělen do několika fází, viz obr. 4.1, a jeho vyhodnocení končí rozhodnutím existence vlivu zkoumaných faktorů na námi sledované veličině – počet upíchnutých kroužků Q .⁷⁴

Vysvětlení pojmů: ^{72, 73, 74}

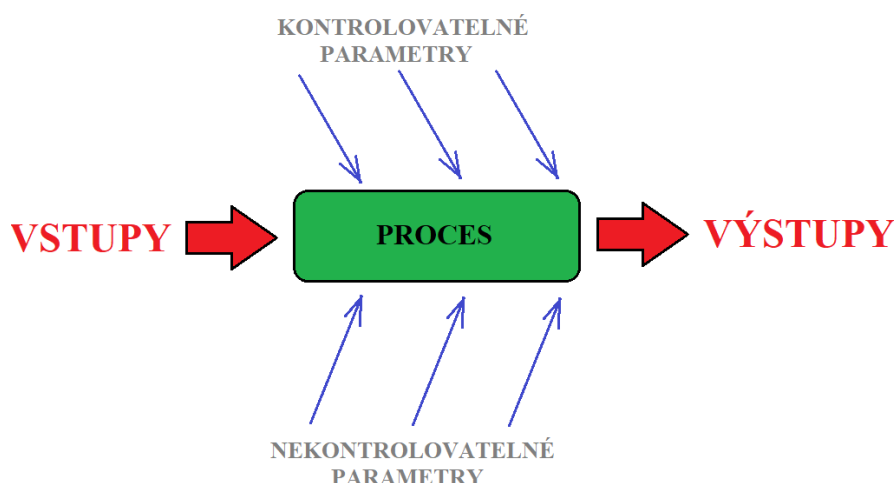
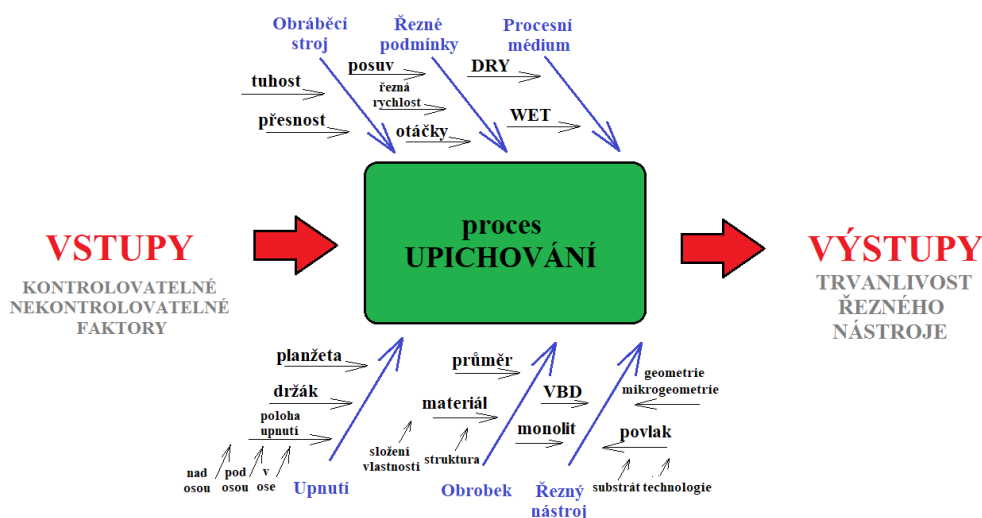
- *sledovaná proměnná (odezva) $Y(Q)$* – výstupní veličina,
- *faktory $X(A, B, C, D)$* – vstupní veličiny, kvalitativní, kvantitativní,
- *interakce* – současné působení několika (alespoň dvou) faktorů,
- *znáhodnění* – stanovení pořadí zkoušek podle náhodného pořadí, částečně může eliminovat působení systematických vlivů po dobu experimentu,
- *replikace (1)* – opakování zkoušek za stejných podmínek,
- *blokování (1)* – uspořádání do bloků slouží ke snižování náhodné variability, představuje jednu repliku experimentu.



Obr. 4.1 Postup plánování experimentů⁷²

V první fázi experimentu jsou zavedeny do procesu všechny možné faktory, které mohou ovlivnit samotný děj a jsou významné pro proces upichování. Úrovně faktorů jsou voleny podle významnosti a je nutné zachovat jejich konstantnost po celou dobu realizace experimentu. V dalším kroku je nutné zvolit vhodnou metodu *DOE* – více faktorový experiment, a to dle časové a finanční náročnosti experimentu. Každý experiment se provádí postupně a je rozdělen do několika fází na základě normy ČSN ISO 3534/3 1993 – Navrhování experimentů.⁷⁵ Samotné měření a zkoušky jsou provedeny ve stanoveném pořadí a jsou důkladně zaznamenávány.

Analýza výsledků souvisí se zvoleným typem hodnocení metody a cílem je vybrat faktory, které mají význam na proces upichování. Ze závěrů a výsledků vyplývají faktory, které mají rozhodující vliv na úroveň kvality vedoucí k optimální hodnotě odezvy. Plánování experimentů patří mezi neúčinnější nástroje pro vytipování kontrolovatelných a nekontrolovatelných faktorů vstupujících do systému. Dále je možno ji použít pro vyhodnocení výrobního procesu společně s jeho výstupy a stanovení charakteristiky měřených veličin, které jsou prioritní pro získání věrohodných, ověřených a objektivních závěrů daného problému, viz obr. 4.2.⁷⁶

Obr. 4.2 Proces DOE⁷⁷

Obr. 4.3 Proces upichování dle DOE

Návrhem experimentu lze docílit kratší doby pro návrh a vývoj nových produktů, vylepšení současných procesů a jejich spolehlivosti. Umožňuje hodnocení různých variant, výběr a nastavení parametrů. Na obr. 4.3 jsou představeny faktory, které mohou vstupovat do procesu upichování.

Návrh experimentu: ^{72, 77, 78}

- zkracuje dobu pro návrh a vývoj nových produktů,
- zlepšuje fungování stávajících procesů,
- zvyšuje spolehlivost a zlepšuje kvalitu výrobků,
- zvyšuje robustnost výrobků a procesů,
- umožňuje vyhodnocení různých variant, výběr komponent, nastavení parametrů a systémových tolerancí.

4.2 Plný faktoriální plán 2^k

Cílem experimentální činnosti bylo navrhnout proces upichování na základě metody Plánovaných experimentů a stanovit faktory ovlivňující proces upichování a jejich význam během procesu obrábění korozivzdorné oceli. Pro návrh a řešení experimentální činnosti byl použit návrh plného faktoriálního plánu, který obsahuje k faktory, kdy každý z nich je na dvou úrovních – návrh 2^k . Tento návrh pokrývá celý experimentální prostor s tím, že jsou testovány všechny kombinace úrovní faktorů. Lze je jednoduše analyzovat a je možno kvantifikovat vztah mezi faktory X a sledovanou proměnnou Y . Velkou nevýhodou těchto návrhů je to, že s rostoucím počtem faktorů roste i počet pokusů (měření).

Důležitým krokem při návrhu experimentu je hodnota replikace. Replikací se rozumí opakování všech kombinací úrovní faktorů experimentu, a to dvakrát nebo vícekrát. Volba replikace je vhodná zejména k měření náhodné chyby a k určení, zda faktor je důležitý nebo ne. Dále aby byl vidět vliv změny úrovně faktoru nejen na průměrnou hodnotu odezvy sledované proměnné Y , ale také na její variabilitu.

Pro experimentální činnost – **testování vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu při upichování korozivzdorné oceli** byly zvoleny **4 faktory**: řezná rychlost – v_c (A), posuv – f (B), velikost zaoblení ostří – r_n (C), mechanická úprava povrchu leštěním – L (D). Úrovně jsou běžně označovány symboly **+ 1** a **- 1**, nebo dolní a horní (low a high). Hodnota úrovně je dána limitní hodnotou pro konkrétní faktor. Sledovanou proměnnou Y byl zvolen **počet upíchnutých kroužků Q** . Každý pokus byl proveden s replikací 1 (Q_1, Q_2). Celkem se jedná o $2^4 = 16$ pokusů (měření) s replikací 2, **tedy 32 testů**.

Tab. 4.1 Vstupní faktory a jejich úrovně

FAKTOR			ÚROVEŇ	
označení			„dolní“ (-)	„horní“ (+)
A	řezná rychlost	v_c [m·min ⁻¹]	110	200
B	posuv	f [mm]	0,08	0,12
C	velikost poloměru zaoblení ostří	r_n [μm]	25	40
D	mechanická úprava povrchu – leštění	L [-]	0	1

Tabulka 4.1 definuje vstupní faktory a jejich úrovně, které budou obsaženy v experimentálním návrhu. Limitní hodnoty velikosti zaoblení poloměru ostří nástroje byly dány výrobcem vyměnitelných břitových destiček. Hodnoty řezných podmínek (řezná rychlost, posuv) byly stanoveny na základě funkčních testů, které byly realizovány před samotným experimentem a jsou součástí následující kapitoly. Testovány byly varianty destiček **s mechanickou úpravou povrchu leštěním (0) a bez ní (1)**.

Pro jednodušší zpracování návrhu a vyhodnocení experimentu byl použit software MINITAB 18. Jedná se o statistický software poskytující statistické nástroje, které jsou využívány k analýze dat a pro následné rozhodování o celém procesu. V tabulce 4.2 jsou znázorněny všechny kombinace úrovní faktorů pomocí dolní a horní úrovně – 16 pokusů.

Tab. 4.2 Plán experimentu 2⁴

Pokus	A	B	C	D	Pokus	A	B	C	D
1	1	-1	-1	-1	9	-1	-1	1	1
2	-1	1	-1	1	10	1	1	-1	-1
3	1	1	1	1	11	-1	-1	-1	1
4	-1	1	-1	-1	12	1	1	-1	1
5	-1	-1	-1	1	13	-1	-1	1	1
6	-1	-1	1	-1	14	1	-1	1	-1
7	-1	-1	-1	-1	15	1	1	-1	-1
8	1	-1	1	1	16	1	1	1	1

Výše uvedené kombinace byly převedeny do tzv. kódovaných proměnných (viz Příloha č. 1). Zde je dolní a horní úroveň nahrazena konkrétní hodnotou, které byly popsány výše v tabulce 4.1. Tato tabulka zahrnuje prvotních 16 pokusů, které mohou být v závislosti na replikaci – 1 opakování

(Q_1, Q_2) rozděleny do dvou bloků. Bloky jsou využívány v případě, že nelze provést měření za jednu směnu/den. Opakování umožňuje výpočet rozptylu jednotlivých pokusů, který je také důležitý pro volbu nastavení vstupních faktorů k zajištění většího počtu upíchnutých kroužků a vyšší trvanlivosti řezného nástroje za daných řezných podmínek. Experiment potom obsahuje celkem 36 pokusů. Tabulka v příloze č. 1 zahrnuje také výsledky (Q) z procesu upichování pro jednotlivé pokusy. Sloupec s označením StdOrder zobrazuje pořadová čísla jednotlivých pokusů před znáhodněním. Sloupec RunOrder udává pořadí pokusů, v němž se experiment realizoval.

4.3 Grafické znázornění experimentální činnosti

Pro přehlednější znázornění je postup experimentální činnosti procesu upichování zobrazen pomocí grafického vývojového diagramu, viz obr. 4.4.



Obr. 4.4 Schéma experimentální činnosti

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

Cílem disertační práce byla analýza procesu upichování korozivzdorné oceli s označením W. Nr. 1.4404 (AISI 316L) za použití prototypových vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu s dvěma různými geometriemi a povrchovou úpravou řezné části nástroje. Pro návrh a analýzu byla použita statistická metoda plánovaných experimentů – Design of Experiment, konkrétně plně faktoriální návrh 2^k se čtyřmi faktory – řezná rychlost v_c , posuv f , poloměr zaoblení ostří r_n , mechanická úprava povrchu leštěním L , a to na dvou úrovních. Sledovanou proměnnou byla zvolena hodnota počtu upíchnutých kroužků – Q o tloušťce kroužku 1 mm.

Vzhledem k vlastnostem korozivzdorné austenitické oceli je očekáváno intenzivní opotřebení nástroje, a to tvorba nárůstku na břitu a jeho následné vyštípnutí. Při procesu upichování lze předpokládat také komplikovaný odchod třísky z místa řezu kvůli nedostatečnému prostoru, který je omezen šířkou upichovacího nože. Všechny tyto komplikace jsou spojeny zejména s volbou obráběného materiálu, geometrie řezného nástroje. Obecně ostřejší geometrie řezného nástroje má i přes lepší řezivost nižší pevnost a může dojít k předčasnému poškození břitu nástroje.


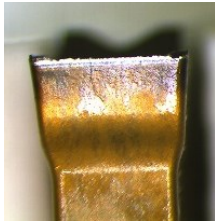
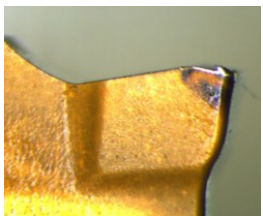
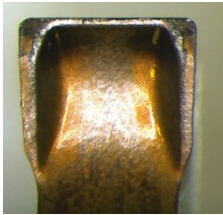
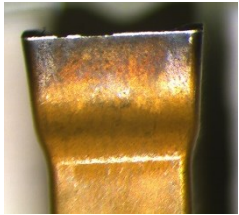
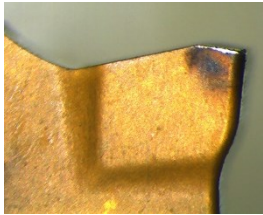

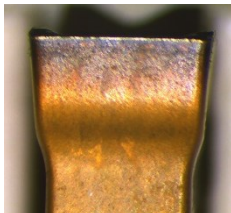
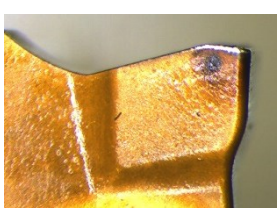

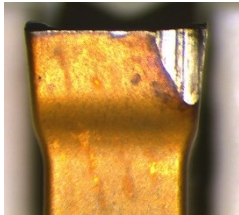

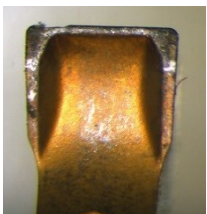
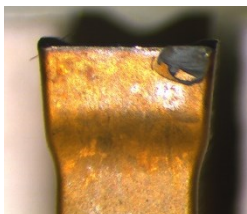
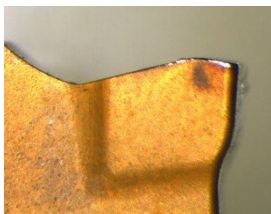

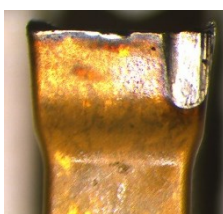

S ohledem na řezné podmínky se předpokládá, že faktor řezné rychlosti, posuvu a jejich kombinace bude mít největší vliv na celý proces upichování. Vlivem mechanické úpravy povrchu došlo k odstranění makročástic z povrchu povlaku, a tím snížení tření mezi nástrojem a obrobkem a zvýšení trvanlivosti řezného nástroje.

Pro analýzu výsledků experimentální činnosti byl využit statistický software MINITAB 18, který sloužil k vyhodnocení statisticky významných členů modelu a jejich vlivů. Proces upichování byl také hodnocen i z pohledu utváření a odchodu třísky z místa řezu. Dále byl sledován postupný vývoj opotřebení břitu prototypových vyměnitelných břitových destiček a stanoveny mechanismy opotřebení ostří upichovacího nože při obrábění korozivzdorné oceli. V závěru byla změřena a vyhodnocena mikrogeometrie obrobeného povrchu, respektive vybrané parametry profilové drsnosti R_a a R_z upíchnutého kroužku.

5.1 Funkční testy

Použitá metoda plánovaných experimentů byla založena na základě plně faktoriálního návrhu o čtyřech faktorech a dvou úrovních. Pro získání limitních hodnot řezných podmínek – řezná rychlost v_c a posuv f byly provedeny funkční testy pro použité vyměnitelné břitové destičky. Původní hodnoty podmínek pro testování materiálu W. Nr. 1.4404 byly zvoleny na základě doporučených hodnot výrobce řezných nástrojů.

Tab. 5.1 Opatření řezného nástroje pro funkční testy

FUNKČNÍ TESTY PROTOTYPOVÝCH VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH TESTIČEK			
Řezné podmínky	Plocha čela A_γ	Plocha hřbetu A_α	Plocha vedlejšího hřbetu A'_α
$v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f = 0,15 \text{ mm}$ $T_{As} = 21 \text{ min}$			
$v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f = 0,08 \text{ mm}$ $T_{As} = 14 \text{ min}$			
$v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f = 0,08 \text{ mm}$ $T_{As} = 11,9 \text{ min}$			
$v_c = 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f = 0,12 \text{ mm}$ $T_{As} = 1,5 \text{ min}$			
$v_c = 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f = 0,15 \text{ mm}$ $T_{As} = 1,2 \text{ min}$			
$v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f = 0,15 \text{ mm}$ $T_{As} = 1 \text{ min}$			

Funkční testy byly realizovány při různých kombinacích řezné rychlosti a posuvu. V první fázi byly testovány destičky při řezné rychlosti $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a hodnoty posuvu $0,15 \text{ mm}$. Na základě vlastností obráběné korozivzdorné oceli docházelo na ostří nástroje k tvorbě nárůstku. Vyšší teplota v místě

řezu způsobovala opal naneseného PVD povlaku. I přes vyšší posuv nástroje nedošlo k předčasnému ukončení testů z důvodu opotřebení řezné části nástroje. Při testování nástrojů výrazně vyšší řeznou rychlostí (180 a $230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) a sníženého posuvu nástroje nedošlo k poškození nástroje a zadané podmínky se jevily jako vhodné pro proces upichování. Jelikož bylo potřeba pro návrh experimentu stanovit limitní hodnotu horní hranice faktorů, byla nastavena vyšší hodnota řezné rychlosti i posuvu. Otestovány byly tři kombinace podmínek, ale ve všech třech případech byl test ukončen z důvodu předčasného vyštípnutí špičky nástroje. Tento fakt stanovil limitní hodnoty horní hranice pro experimentální testování řezných nástrojů pro upichovací operace.

Řezné podmínky byly zvoleny následovně:

Řezná rychlost:	$v_{c1} = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_{c2} = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv:	$f_1 = 0,08 \text{ mm}$	$f_2 = 0,12 \text{ mm}$

5.2 Hodnocení plánovaného experimentu – původní model

Výsledky experimentální činnosti byly vyhodnoceny pomocí statistického softwaru MINITAB 18. Metodou Plánovaného experimentu s využitím plně faktoriálního plánu byly získané výsledky zpracovány. Sledovanou veličinou byla zvolena hodnota Q , tedy počet upíchnutých kroužku za daných podmínek obrábění. Při vyhodnocení procesu bylo již dopředu nastaveno vyřazení nevýznamných členů z modelu. Pro vyhodnocení a jednodušší interpretaci významnosti vlivu jednotlivých členů modelu včetně analýzy residuí byly sestaveny jednotlivé grafy.

5.2.1 Významnost faktorů – regresní analýza

Regresní analýzy a jejich metody jsou využívány pro stanovení závislosti určité kvantitativní proměnné na jedné nebo více dalších kvantitativních proměnných. Cílem těchto analýz je popis závislosti pomocí vhodného matematického modelu. Podstatou řešení regrese je stanovení nejlepšího regresního modelu – matematické rovnice, které budou popisovat jednotlivé proměnné, závislosti y na x_1, x_2 až x_n . Při upichování bude stanovena závislost řezných podmínek (posuv a řezná rychlost), poloměru zaoblení ostří a úprava povrchu leštěním na počtu upíchnutých kroužků.⁶⁴

Pro regresní analýzu byly vyhodnoceny tzv. dílčí testy kódovaných proměnných. Ze souboru dat jsou důležité hodnoty ve sloupci „Effect“ a „P-value“. Sloupec „Effect“ neboli účinek ukazuje velikost změny odezvy při přechodu mezi krajními hodnotami nastavení příslušného faktoru. Hodnoty ve sloupci „P-value“ definují, jak jsou jednotlivé faktory a jejich kombinace důležité z hlediska statistické významnosti. Jejich významnost je určena na základě testování při hladině významnosti α^{95} , pro kterou byla zvolena hodnota 5 % (0,05). V případě, že P-hodnota bude menší než zadaná hladina významnosti, nulová hypotéza H_0 je zamítnuta a faktor je statisticky významný. V opačném případě nelze H_0 zamítnout, faktor je nevýznamný a lze ho tedy vyloučit z modelu.

Podmínka: $H_0: x_i = 0$ a $P\text{-value} < \alpha^{95} < 0,05$

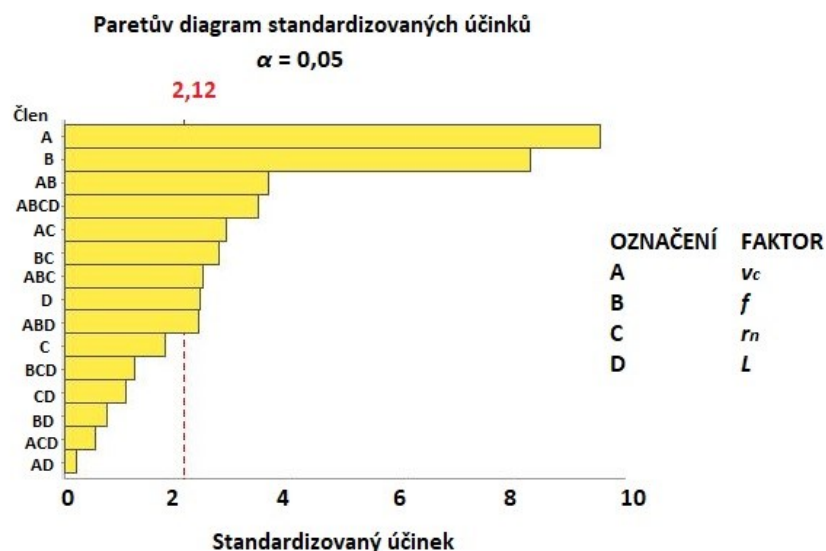
Výsledek: **zamítnutí** nulové hypotézy, faktor nelze vynulovat a **má význam v modelu**.

Tab. 5.2 Dílčí testy faktorů a jejich kombinací

Faktor / Kombinace faktorů	Účinek (Effect)	P - value	Významnost
v_c	-43,38	0,000	VÝZNAMNÝ
f	-37,75	0,000	VÝZNAMNÝ
r_n	-8,12	0,095	NEVÝZNAMNÝ
L	11,00	0,029	VÝZNAMNÝ
$v_c * f$	-16,50	0,002	VÝZNAMNÝ
$v_c * r_n$	13,12	0,011	VÝZNAMNÝ
$v_c * L$	1,0	0,830	NEVÝZNAMNÝ
$f * r_n$	-12,50	0,015	VÝZNAMNÝ
$F * L$	-3,38	0,472	NEVÝZNAMNÝ
$r_n * L$	5,00	0,291	NEVÝZNAMNÝ
$v_c * f * r_n$	11,25	0,026	VÝZNAMNÝ
$v_c * f * L$	-10,88	0,030	VÝZNAMNÝ
$v_c * r_n * L$	-2,50	0,593	NEVÝZNAMNÝ
$f * r_n * L$	-5,63	0,237	NEVÝZNAMNÝ
$v_c * f * r_n * L$	-15,63	0,004	VÝZNAMNÝ

V tabulce 5.2 je zobrazeno shrnutí pro všechny faktory a jejich kombinace z pohledu významnosti. Navržený model potvrdil, že největší vliv na počet upíchnutých kroužků měly faktory řezných podmínek a jejich kombinace. Statisticky významný člen je i faktor leštění, který byl vyhodnocen na 2,9 %. Naopak samostatně stojící faktor – velikost poloměru zaoblení ostří neprojevil takový vliv na proces upichování a počet upíchnutých kroužků a lze jej z modelu vyloučit. Jako významná kombinace faktorů pro tento model byla označena také kombinace posuvu a poloměru zaoblení ostří.

Pro grafické znázornění modelu byl použit Paretův diagram, ve kterém je významnost jednotlivých členů v modelu hodnocena na základě červené linky, která je definována jako kritická hodnota 5 % pro zamítnutí nulové hypotézy. Paretova analýza označuje proces hledání malého spektra příčin, které významně ovlivňují celkový výsledek procesu. Na obrázku 5.1 je znázorněn Paretův diagram, kde je vidět vliv faktorů na standardizovaném účinku při hladině významnosti 5 %. Faktory ležící od červené čárkované čáry doleva jsou vyhodnoceny jako statisticky nevýznamné a ty vpravo statisticky významné. Z modelu lze tedy vyloučit faktor C – velikost poloměru zaoblení r_n a vybrané kombinace faktorů ($v_c * L$, $f * L$; $r_n * L$; $v_c * r_n * L$; $f * r_n * L$).



Obr. 5.1 Paretův diagram

Pro model procesu upichování korozivzdorných ocelí byl stanoven i koeficient determinace modelu R^2 . Koeficient determinace vyjadřuje, jakou část celkové variability závislé proměnné objasňuje regresní model. Jinými slovy udává, do jaké míry je daný model kvalitní a do jaké části je sledovaná proměnná závislá na jednotlivých faktorech. Pro model upichování korozivzdorných ocelí byl koeficient determinace vyhodnocen na $R^2 = 86,98 \%$. Tato hodnota vypovídá o vysoké významnosti modelu a naznačuje dobrou shodu mezi experimentálně dosaženými a predikovanými počty upíchnutých kroužků. Zbýlých 13,02 % poukazuje na působení okolních vlivů, které mohly způsobit změny během obrábění. Jednalo se zejména o nehomogenitu struktury polotovaru materiálu W. Nr. 1.4404, neboť pro experimenty bylo použito 20 kusů kruhových tyčí o délce 500 mm z různých taveb. Dále zde lze zahrnout i odchylky v geometrii vyměnitelných břitových destiček, které byly použity pro testy. Proces upichování ovlivňovala i tuhost stroje a vznik nežádoucích vibrací.

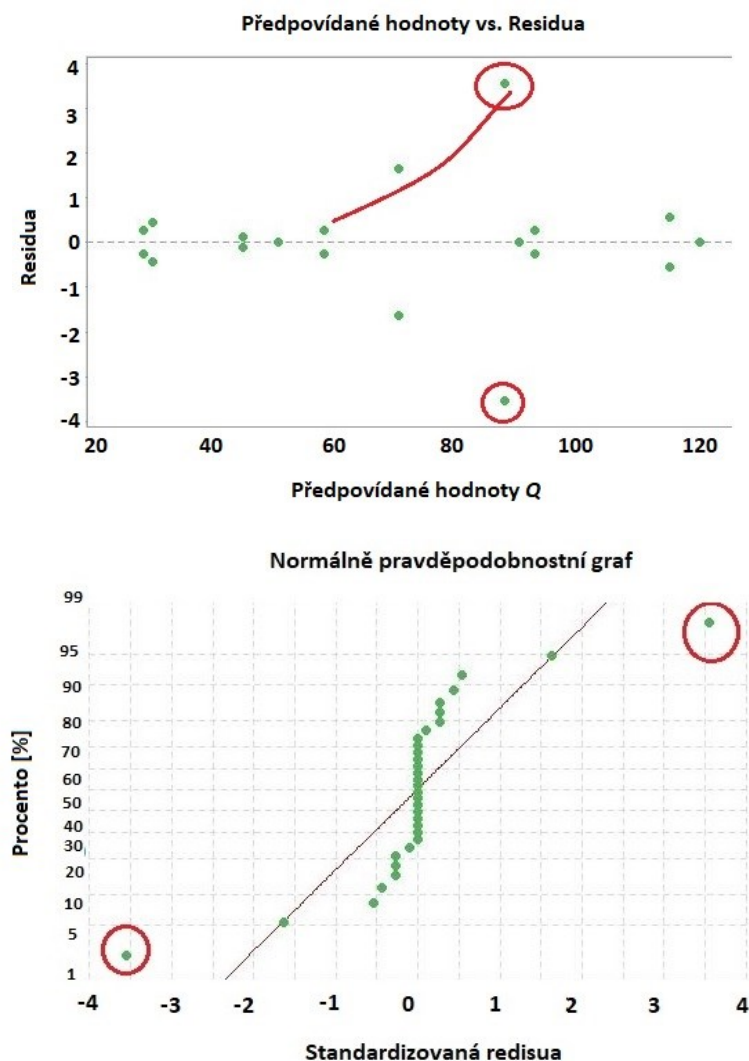
5.2.2 Analýza residuí

Analýza residuí poskytuje informaci o vhodnosti použitého modelu a může odhalit body, jejichž residuum je výrazně odlišné od ostatních pozorování. Residua jsou odchylky pozorovaných hodnot od modelových hodnot a jsou odhadem náhodných vlivů. Pro model procesu upichování byla vypočtena regresní rovnice (5.1). Po dosazení hodnot pro jednotlivé kombinace všech 32 pokusů lze vyhodnotit predikovaný počet upíchnutých kroužků pro tento model. Výsledné hodnoty residuí by byly rozdíly predikované hodnoty a hodnoty naměřené, které jsou uvedeny v příloze č. 2.

$$\begin{aligned}
 Q = & -737 + 5,54 \cdot v_c + 10\,398 \cdot f + 28,69 \cdot r_n + 822 \cdot L - 67,8 \cdot v_c \cdot f - 0,1759 \cdot v_c \cdot r_n - 6,05 \cdot v_c \cdot L - 331,5 \cdot \\
 & f \cdot r_n - 8738 \cdot f \cdot L - 30,3 \cdot r_n \cdot L + 1,991 \cdot v_c \cdot f \cdot r_n + 63,1 \cdot v_c \cdot f \cdot L + 0,2241 \cdot v_c \cdot r_n \cdot L + 321 \cdot f \cdot r_n \cdot L \\
 & - 2,315 \cdot v_c \cdot f \cdot r_n \cdot L
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Z porovnání výsledků naměřených a predikovaných hodnot Q lze pozorovat dvě odlehlé hodnoty, a to u pokusu č. 1 a 18. Jedná se o pokusy pro stejnou kombinaci faktorů. Zde vyšel výrazný rozptyl těchto hodnot a odchylka je zde mnohem větší v porovnání s ostatními hodnotami. Toto je zobrazeno v níže uvedených grafech.

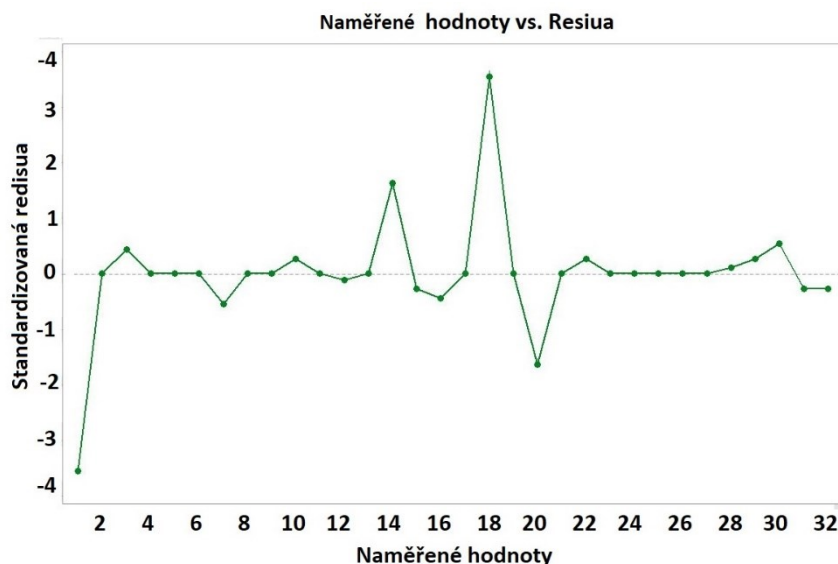
Pro posouzení residuí byly sestaveny grafy, viz obr. 5.2a, b. Pro obrázek 5.2a platí závislost residuí na predikované hodnotě. Hodnoty by měly být náhodně rozptýleny. Z grafu lze také pozorovat, že predikovaná residua se snaží vytvářet funkci, což pro model není ideální. Naopak lze také konstatovat, že odchylka predikovaných a naměřených hodnot je převážně malá. Pouze v oblasti predikované hodnoty $Q = 85$ residua výrazně vybočují (hodnoty pokusu č. 1 a 18). Z obrázku 5.2b lze vidět procentuální závislost na residuích. Z grafu lze konstatovat, že výsledná residua nevykazují heteroskedasticitu, tzv. konstantní rozptyl hodnot. Závislá proměnná Q nemá pro všechny hodnoty faktory stanovené nezávisle. V případě normality, viz obr. 5.2b by body měly být v těsné blízkosti přímky.



Obr. 5.2 Výsledky residuí

a) Závislosti predikovaných hodnot na residuích; b) Normálně pravděpodobnostní graf

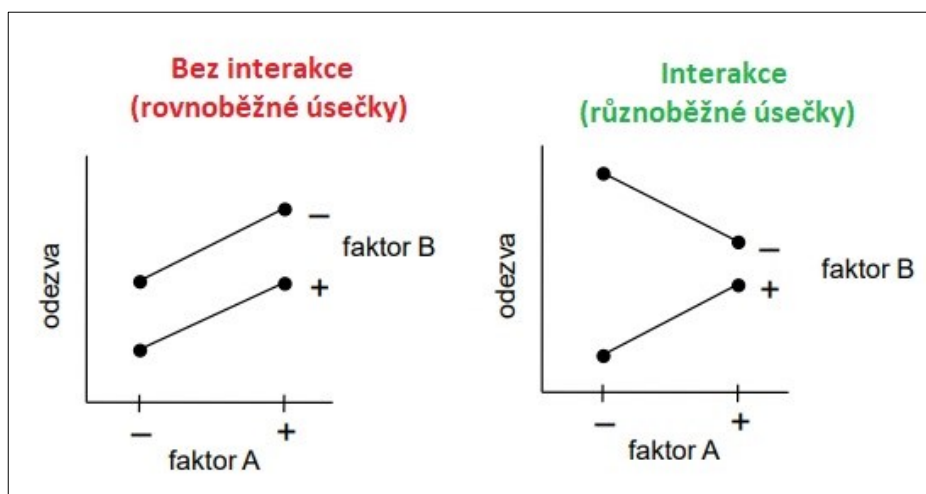
Obrázek 5.3 popisuje závislost residuí na naměřených hodnotách. Z grafu lze pozorovat, že odchylky od nulové hodnoty jsou minimální a nejčastěji nulová. Negativní výsledek je opět vidět u pokusu č. 1 a 18. Zde je vidět výrazná odchylka od nulové hodnoty. Tento výkyv byl potvrzen na základě vyhodnocení v softwaru MINITAB 18. Množství upíchnutých kroužků Q pro pokusy č. 1 a 18 byly 55 a 120 kroužků. Predikovaná hodnota pro tyto parametry byla vypočtena 89,19 kroužků, viz tab. 2 v příloze č. 1., a vznikla odchylka standardizované residuum $\pm 3,55$.



Obr. 5.3 Vyhodnocení residuí u naměřených hodnot

5.2.3 Interpretace účinků

Interpretace účinků jednotlivých členů modelu usnadňuje jejich grafické znázornění. Diagram hlavních účinků ukazuje průměrnou změnu odezvy při přechodu faktoru z dolní úrovně na horní za předpokladu, že ostatní faktory jsou konstantní. Rozdíl všech měření na horní úrovni a průměr všech měření na dolní úrovni je nazýván **hlavním účinkem**.⁷⁹

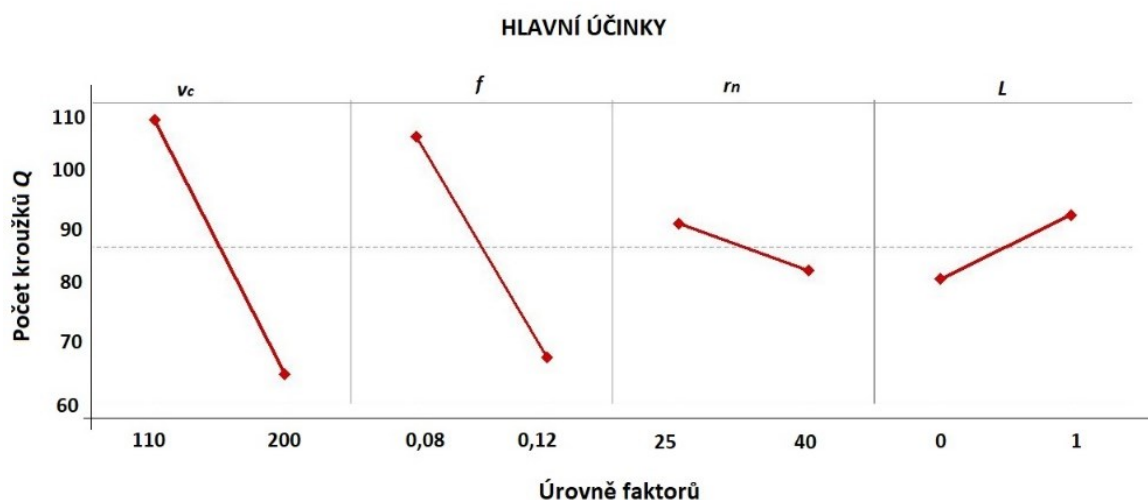


Obr. 5.4 Grafický příklad interakce faktorů A a B⁷⁹

Diagram interakcí popisuje vliv jednoho faktoru, kdy je druhý faktor zafixován buď na dolní, nebo horní úrovni. Na obrázku 5.4 je uveden grafický příklad pro vysvětlení interakce faktorů A a B. Je-li přírůstek odezvy při přechodu z dolní na horní úroveň faktoru konstantní, pak je interakce nevýznamná. Tím se rozumí rovnoběžnost přímek dolní a horní úrovně. V případě, že je interakce přítomna, vliv jednoho faktoru na odezvě Q není stejný pro všechny úrovně jiného faktoru – přímky jsou různoběžné.⁷⁹

- **Hlavní účinky modelu**

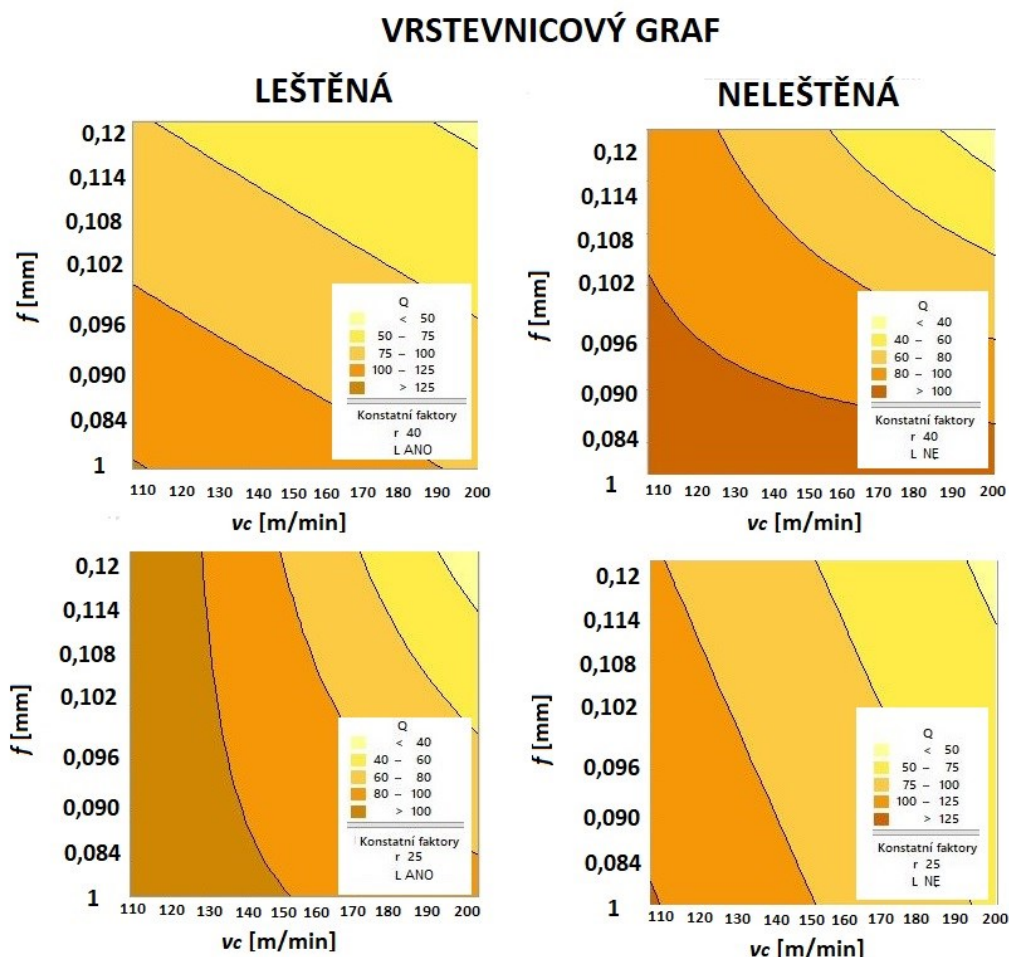
Z teorie obrábění platí, že největší vliv na opotřebení, a tedy na trvanlivost břitu nástroje má řezná rychlost s hodnotou posuvu což bylo potvrzeno na obrázku 5.5 pro hlavní účinky.



Obr. 5.5 Hlavní účinky modelu

Významnost hlavního účinku potvrdila i nulová P-hodnota v dílčích testech. V obou případech se jednalo o velký kladný sklon úsečky. Při přechodu z dolní hranice ($v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,08 \text{ mm}$) na horní ($v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,12 \text{ mm}$) došlo k rapidnímu snížení počtu upíchnutých kroužků. Pro faktor C – velikost poloměru zaoblení ostří obecně platí, že ostřejší břit má nižší pevnost, ale naopak lepší řezivost v porovnání s větším poloměrem zaoblení. Pro tento model experimentu však velikost poloměru nehrála takovou roli a přechod z dolní ($r_n = 25 \mu\text{m}$) na horní hranici ($r_n = 40 \mu\text{m}$) nevykazoval výrazný pokles počtu upíchnutých kroužků v závislosti na počtu upíchnutých kroužků. I přesto lze pro tento model konstatovat, menší poloměr zaoblení měl větší vliv na hodnotu Q během procesu upichování. Mechanická úprava povrchu leštění měla zajistit odstranění nerovností na povrchu řezné části VBD, snížit tření během procesu, a tedy i velikost mechanického a tepelného namáhání. Pro tento faktor byl průběh v porovnání s ostatními hodnocenými faktory inverzní. Větší množství materiálu bylo odebráno při přechodu na horní hranici (neleštěná varianta). Během leštění mohlo dojít vlivem působení plochého kartáče k poškození a ztenčení vrstev naneseného PVD povlaku, což způsobilo zrychlený vývoj opotřebení břitu nástroje až po vyštípnutý špičky nástroje.

Z diagramu hlavních účinků pro tento model vyplynulo, že výrazný vliv na proces upichování mají řezné podmínky, a to řezná rychlost v_c a posuv f . Z toho důvodu byly sestaveny grafy vrstevnic (obr. 5.6), které popisují plochu odezvy Q závislou na dvou vybraných spojitých faktorech – řezná rychlost a posuv. Faktory poloměr zaoblení ostří a mechanická úprava povrchu jsou fixní na dolní a horní hranici. Tento graf barevně odlišuje oblasti, kde počet kroužků nabývá hodnot dle rozsahů upíchnutých kroužků.



Obr. 5.6 Závislost plochy odezvy Q na dvou faktorech při konstantním r_n a L

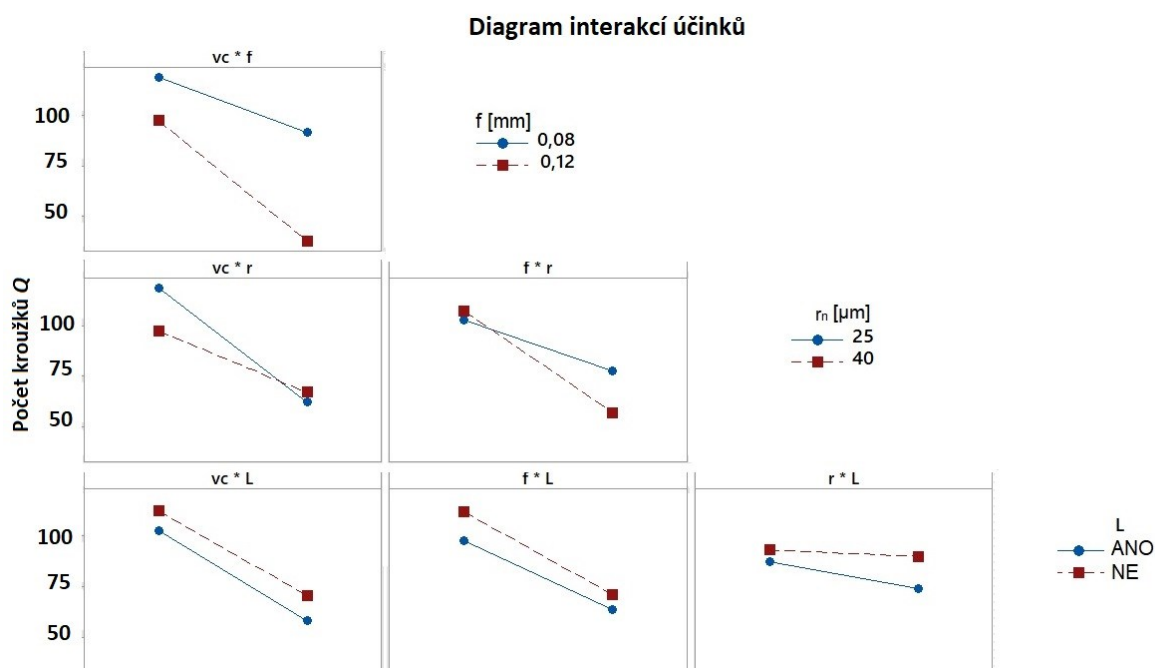
Ve všech případech lze největší výtěžnost pozorovat v pravé části grafu, a to od nejmenších hodnot obou faktorů. S rostoucí řeznou rychlostí a hodnotou posuvu klesá počet kroužků. Podle tvaru a rozložení vrstevnic lze pozorovat rozdíly jak u leštěné a neleštěné variantě VBD, tak u velikosti poloměru zaoblení ostří nástroje. U grafu, kde je konstantní hodnota poloměru zaoblení a mechanické úpravy povrchu ($r_n = 40 \mu\text{m}$ – leštěná a $r_n = 25 \mu\text{m}$ – neleštěná) lze vidět klesající lineární průběh.

5.2.4 Diagram interakcí dvou faktorů

Z obrázku 5.7 lze vyhodnotit interakční účinky mezi jednotlivými faktory v závislosti na počtu upíchnutých kroužků. V případě paralelního působení úseček pro vybrané grafy je interakce

nevýrazná a má zanedbatelný vliv na hodnotu Q . U grafů interakce řezné rychlosti s ostatními faktory se ve všech případech jednalo o záporný hlavní účinek řezné rychlosti. U grafu řezné rychlosti a posuvu je vidět velká interakce, neboť úsečky mají tendenci se rozbíhat. Jedná se o tzv. synergismus. Tento diagram interakcí potvrzuje, že se zvýšením řezné rychlosti dojde ke snížení počtu upíchnutých kroužků pro obě hodnoty posuvu. Graf působení faktoru řezné rychlosti a mechanické úpravy povrchu leštěním nevykazuje žádnou interakci, neboť úsečky jsou téměř rovnoběžné a úbytek je z přechodu z dolní na horní hranici konstantní. Z tohoto grafu lze vyčíst, že upichování neleštěnou variantou VBD za obou řezných rychlostí bude zhotoveno více kroužků. Významná interakce nastává při kombinaci posuvu a řezné rychlosti, kde se úsečky navzájem kříží. Lze zde vidět, že větší množství kroužků bude zajištěno u nižší řezné rychlosti a ostřejší geometrie VBD. Naopak pokud dojde ke zvýšení hodnoty v_c , lepšího výsledku bude dosaženo s větším poloměrem zaoblení ostří.

Další graf popisující působení hlavního faktoru f – posuvu na počtu kroužků s fixním faktorem velikosti poloměru zaoblení a mechanické úpravy leštěním lze vidět opět záporný hlavní účinek. Významný vliv interakce nastává u grafu s faktory posuvu a velikosti poloměru zaoblení, kdy úsečky horní a dolní hranice se kříží. Pokud bude zvolena nízká hodnota posuvu nástroje, je nutno zvolit břit s větším poloměrem zaoblení. U horní hranice posuvu toto neplatí a je doporučeno vybrat ostřejší geometrii. U působení faktoru leštění s hodnotou posuvu je interakce nulová s téměř konstantním přírůstkem. Jako poslední je zohledněna možná interakce mezi velikostí poloměru zaoblení a leštěním. Zde lze pozorovat opět nepatrnou interakci.



Obr. 5.7 Diagram interakcí pro původní model

Ze všech diagramů interakcí pro všechny čtyři zvolené faktory lze opět potvrdit malou významnost faktoru C – poloměru zaoblení ostří a D – leštění. Všechny interakce mají klesající průběh, přičemž se zvyšující hodnotou faktoru na ose x klesá počet upíchnutých kroužků u obou limitních hodnot druhého faktoru. Jak bylo v úvodu zmíněno, podle Paretovy analýzy a T-testu se v modelu nachází statisticky nevýznamné faktory nemající vliv na proces upichování korozivzdorných ocelí, které lze vyloučit z modelu. Odstraněním nevýznamných faktorů a kombinací lze zpřesnit interpretaci výsledků. V následující podkapitole 5.3 je vyhodnocen celý model již bez nevýznamných faktorů a kombinací.

5.3 Hodnocení plánovaného experimentu – optimalizovaný model

Původní model řešený v kapitole 5.2 obsahoval naměřená data pro všechny faktory a jejich kombinace. Za použití T – testu byly na základě hladiny významnosti označeny nevýznamné faktory a jejich kombinace, viz tab. 5.3. Hladina významnosti byla zvolena 0,05. Důležité bylo se správně rozhodnout u faktoru C – velikost poloměru zaoblení, zda jej odstranit nebo jej ponechat jako statisticky významný. Jeho P-hodnota byla větší jako hladina významnosti 0,05, ale nepřekročila 1 %. Pro přehled byla provedena analýza dílčích testů, kde byly vyloučeny nevýznamné faktory s P-hodnotou větší jako 0,1. I přes zachování faktoru C software automaticky vyloučil tento faktor a potvrdil jeho statistickou nevýznamnost. Původní model byl tedy přepracován s odstraněním šesti nevýznamných členů původního modelu procesu upichování korozivzdorných ocelí.

Tab. 5.3 Nevýznamné faktory a jejich kombinace

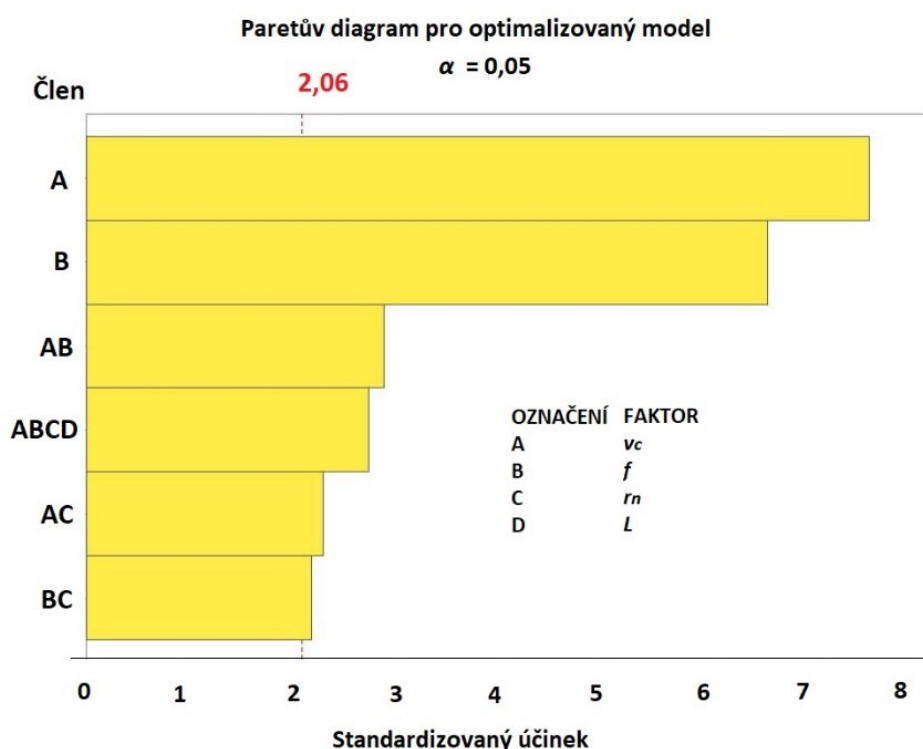
velikost poloměru zaoblení ostří	C	r_{ε}	P-value = 0,095
kombinace řezné rychlosti a leštění	$A * D$	$v_c * L$	P-value = 0,830
kombinace posuvu a leštění	$B * D$	$F * L$	P-value = 0,472
kombinace velikosti poloměru zaoblení a leštění	$C * D$	$r_n * L$	P-value = 0,291
kombinace řezné rychlosti, poloměru a leštění	$A * C * D$	$v_c * r_n * L$	P-value = 0,593
kombinace posuvu, poloměru a leštění	$B * C * D$	$F * r_n * L$	P-value = 0,237

Optimalizovaný model byl vyhodnocen opět na základě dílčích testů, u kterého bylo zohledněno šest členů. Pro nový model byla u všech členů vyhodnocena P-hodnota, viz tab. 5.4, která byla menší jako hladina významnosti $\alpha^{95} = 0,05$ a všechny členy byly označeny jako statisticky významné. Stejně jako v předchozím modelu vyšla u všech členů hodnota VIF rovna 1. Tento pojem hodnotí vícenásobnou lineární regresi – multikolinearitu, která stanovuje sílu závislosti mezi vysvětlujícími faktory. Čím nižší číslo, tím multikolinearita odeznívá. Jedná se o nežádoucí vlastnost, která může způsobit snížení přesnosti odhadů individuálních hodnot, nízké hodnoty pro dílčí testy. Regresní koeficienty se pak jeví jako statisticky nevýznamné i v případě kvalitního modelu. V obou případech

se o vícenásobnou lineární regresi nejednalo. Pro přehlednější znázornění byl sestrojen opět Paretův diagram, viz obr. 5.8.

Tab. 5.4 Dílčí testy pro optimalizovaný model

Faktor / Kombinace faktorů	Účinek (Effect)	P - value	Významnost
v_c	-43,38	0,000	VÝZNAMNÝ
f	-37,75	0,000	VÝZNAMNÝ
$v_c * f$	-16,50	0,009	VÝZNAMNÝ
$v_c * r_n$	13,13	0,033	VÝZNAMNÝ
$F * r_n$	-12,50	0,041	VÝZNAMNÝ
$v_c * f * r_n * L$	-15,62	0,013	VÝZNAMNÝ

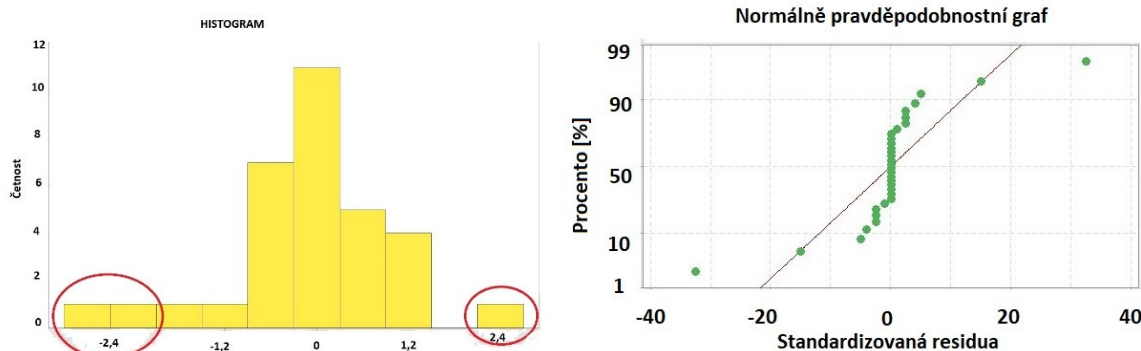


5.8 Paretův diagram pro optimalizovaný model

Opět byl stanoven koeficient determinace modelu R^2 s vypočtenou hodnotou 79,08 %. Odstraněním nevýznamných členů z optimalizovaného modelu se může optimalizace procesu jevit jako méně objektivní a snižovat tak jeho kvalitu. Pokud je model zhodnocen podle množství a rozložení residuí, lze konstatovat, že optimalizace přinesla konstantní rozptyl hodnot – heteroskedasticitu a závislá proměnná Q má pro všechny hodnoty nezávislé faktory. Body se vyskytují poblíž přímky a definují normalitu procesu. Jak z histogramu 5.9a a grafu 5.9b lze pozorovat opět odlehle hodnoty.

Pro nový model byla vypočtena opět regresní rovnice (5.2), která určí velikost residuí a predikovanou hodnotu Q pro jednotlivé kombinace. Po dosazení do rovnice byly vypočteny předpokládané počty kroužků, viz příloha č. 3.

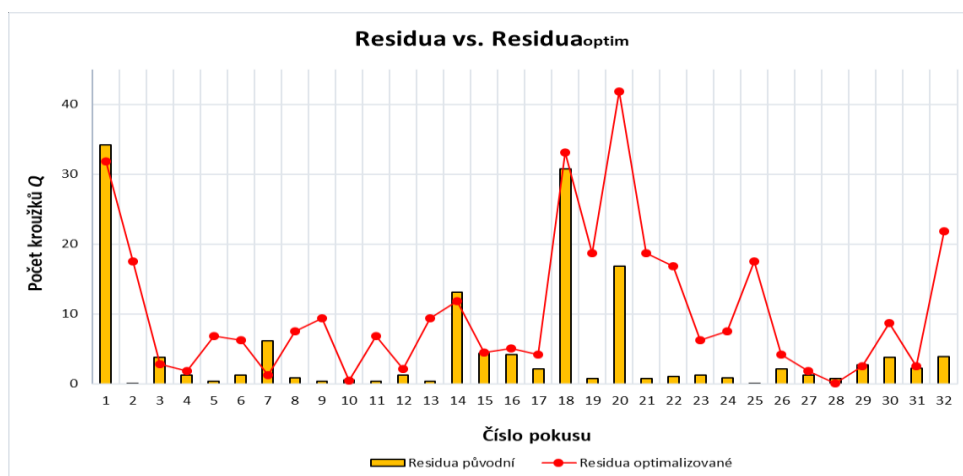
$$Q = 86,44 - 21,69 \cdot v_c - 18,87 \cdot f - 8,25 \cdot v_c \cdot f + 6,56 \cdot v_c \cdot r_n - 6,25 \cdot f \cdot r_n - 7,81 \cdot v_c \cdot f \cdot r_n \cdot L \quad (5.2)$$



5.9 Vyhodnocení residuí

a) histogram b) normálně pravděpodobnostní graf

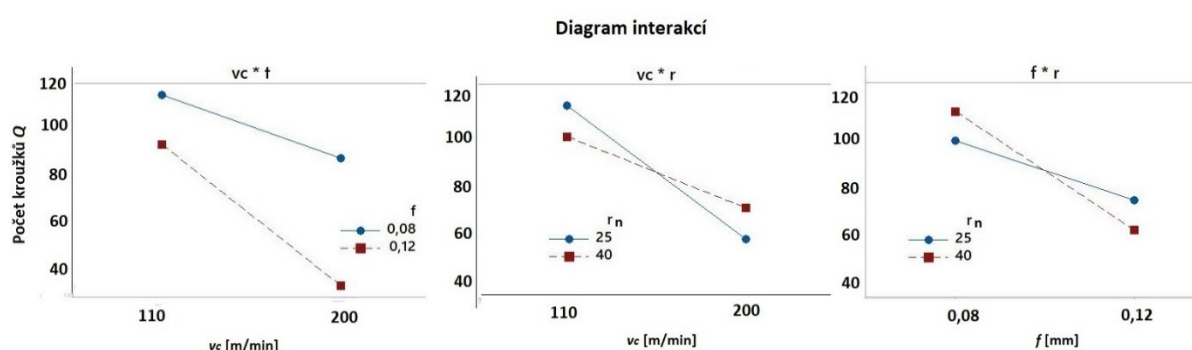
Po odstranění nevýznamných členů z modelu byla vypočtena residua a hodnota Q pro predikovaný počet kroužků. Jak lze vidět z tabulky, abnormalita byla opět potvrzena u pokusu č. 1 a 18. Významná změna byla potvrzena i u pokusu č. 20, kde byla odchylka největší. Pro porovnání residuí počtu predikovaných kroužků od naměřené hodnoty pro původní a optimalizovaný model byl sestaven graf, viz obr. 5.10. Vylepšení původního modelu bylo docíleno odstraněním nevýznamných faktorů za účelem bližší specifikace faktorů, které jsou významné. Pokud zhodnotíme výsledek v grafu 5.10, lze potvrdit, že optimalizací došlo ke zvětšení odchylek (residuí) v porovnání s původním modelem. Z výsledků lze konstatovat, že nastavení modelu není příliš kvalitní a předpokládaná hodnota počtu kroužků se výrazně liší od naměřených dat.



Obr. 5.10 Porovnání odchylek pro původní a optimalizovaný model

Z grafů hlavních účinků bylo zřejmé, že řezná rychlost a posuv jsou opět statisticky významné pro model a s jejich vyšší hodnotou klesá počet upíchnutých kroužků. Interakce faktorů v_c a f se nezměnila. Opět se jedná o synergismus. Naopak u diagramu interakcí, viz obr. 5.11, řezné rychlosti a velikosti poloměru zaoblení, posuvu a velikosti poloměru zaoblení dochází ke vzniku silné interakce a úbytek není konstantní.

Se zvyšující hodnotou řezné rychlosti a menším poloměrem zaoblení klesá počet kroužků. Proto je doporučeno upichovat s vyšší hodnotou řezné rychlosti a s větším poloměrem zaoblení ostří nástroje. Naopak je to u interakce posuv a velikost poloměru zaoblení. Vyšší produktivity bylo dosaženo při malé hodnotě posuvu s větším poloměrem zaoblení. Pokud bude nastavena vyšší hodnota posuvu, je nutno použít ostřejší břit nástroje.



Obr. 5.11 Diagram interakcí optimalizovaného modelu

5.4 Optimalizace odezvy

Za pomoci nástroje optimalizace odezvy lze naleznout takovou kombinaci nastavení faktorů, která optimalizuje odezvu Q – počet upíchnutých kroužků. Touto optimalizací se rozumí dosažení nebo alespoň přiblížení se maximální/minimální nebo konkrétní cílové hodnotě.

Za námi nastavených podmínek bylo dosaženo odezvy 120 kroužků. Optimalizace odezvy byla provedena pro všechny tři varianty – maximum, minimum a konkrétní cílová hodnota.

- **Minimální cílová hodnota**

Pro stanovení minimální cílové hodnoty byl použit limitní počet kroužků 25 ks, který vyšel během testování. Pokud bude potřeba cíleně dosáhnout nejnižšího počtu kroužků, je nutné nastavit následující parametry obrábění:

- $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
- $f = 0,12 \text{ mm}$,
- $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$,
- L – ANO.

Toto nastavení procesu upichování korozivzdorné oceli minimalizuje odezvu na 29,5 ~ **29 kroužků**, jejichž 95 % interval spolehlivosti je (13,68; 45,32). Hodnota d – míra splnění požadované cílové hodnoty určuje procentuální dosažení cíle. Hodnota d byla rovna $d = 0,95263$ a cíle bylo dosaženo na 95 %.

- **Maximální cílová hodnota**

Stejným postupem byla provedena optimalizace odezvy pro získání parametrů maximální hodnoty odezvy Q . Pro dosažení největšího počtu upíchnutých kroužků bylo nutné nastavit pro proces upichování následující parametry:

- $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
- $f = 0,08 \text{ mm}$,
- $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$,
- $L - \text{NE}$.

Upichování korozivzdorné oceli za těchto podmínek maximalizuje odezvu na 126,88 ~ **126 kroužků**, jejichž 95 % interval spolehlivosti je (111,06; 142,69). Hodnota D byla vypočtena 1, cíle bylo dosaženo na 100 %.

- **Konkrétní cílová hodnota**

Konkrétní hodnota Q , pro kterou chceme získat parametry procesu obrábění, byla původně zvolena 300 kroužků. Pro tuto navrženou hodnotu vyšla míra splnění pouze 58 %. To znamená, že za navržených parametrů bude dosaženo 300 kroužků pouze na 58 %. Z toho důvodu byla cílová hodnota upravena na 150 kroužků. V tomto případě splnění cíle by bylo dosaženo na 82 %. Za níže uvedených parametrů se lze přiblížit k cílové hodnotě. Pro tento výpočet vyšla hodnota odezvy Q 126,88 ~ 126 kroužků. Jak lze vidět maximální a cílová optimalizace odezvy jsou totožné. Pro navržené limitní hodnoty faktorů lze upíchnout pouze **126 kroužků** za daných parametrů:

- $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
- $f = 0,08 \text{ mm}$,
- $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$,
- $L - \text{NE}$.

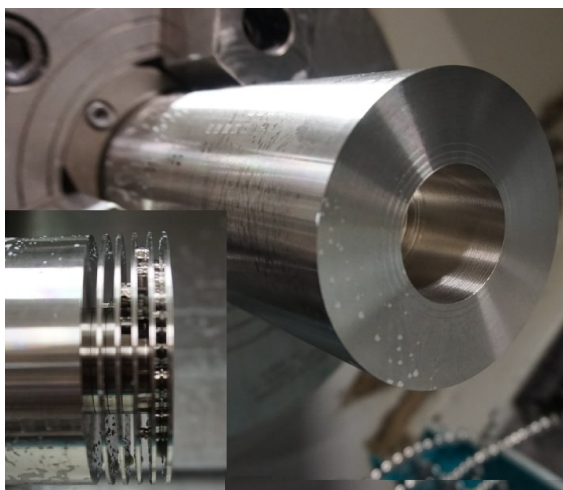
Pro získání maximální výtěžnosti v podobě počtu upíchnutých kroužků z materiálu W. Nr 1.4404 (AISI316L) je nutno zvolit dolní hranici hodnot řezné rychlosti a posuvu, ostřejší geometrii břítu řezného nástroje a vyměnitelnou břitovou destičku bez mechanické úpravy povrchu.

6 HODNOCENÍ PROCESU UPICHOVÁNÍ

Jak už bylo vysvětleno a popsáno v kapitole 1 této práce, proces upichování patří mezi specifické operace soustružení, kdy dochází k oddělování finálního výrobku od polotovaru. Vzhledem ke kinematice procesu je důležité klást důraz na geometrii řezného nástroje a na volbu řezných podmínek. Během upichování dochází k tvorbě úzké drážky o šířce použité vyměnitelné břitové destičky. Po stranách je nástroj obklopen materiálem obrobku a hotového výrobku. Špatné utváření třísky by mohlo vést k poškození obrobených povrchů a silnému mechanickému zatížení břitu nástroje vedoucímu ke snížení jeho trvanlivosti. Opotřebení břitu, tvar a odchod třísky z místa řezu je také ovlivněn materiálem řezného nástroje, jeho geometrií, řeznými podmínkami, strukturou a vlastnostmi obráběného materiálu.

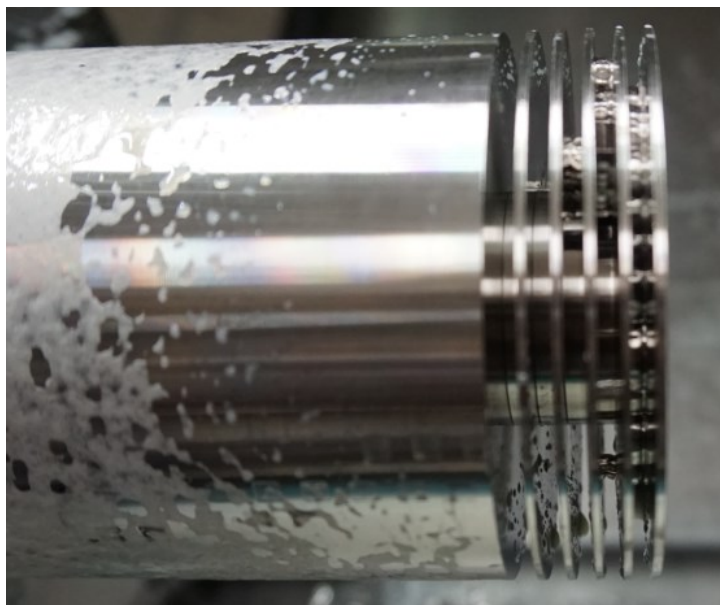
Pro experimentální činnost byla zvolena austenitická korozivzdorná ocel s označením W.Nr. 1.4404 (AISI 316L). Vybrané korozivzdorné oceli jsou řazeny mezi materiály se zhoršenou obrobitelností. Obrobitelnost těchto ocelí je dána vlastnostmi materiálu ovlivňující celý průběh procesu. K obrábění korozivzdorných ocelí je nutno použít destičky s ostrou pozitivní geometrií o vysokou řezivostí. Nutné je i zvolit správné řezné podmínky, které budou mít vliv na vznik nárůstku, tvorbu opotřebení, ale i tvar odcházející třísky.^{15, 21}

Experimentální činnost byla zaměřena na upichování kroužků o tloušťce $b = 1$ mm s vnitřním průměrem $D_1 = 36$ mm a vnějším průměrem $D_o = 80$ mm. Rozměr otvoru byl stanoven na základě konstrukčního řešení držáku s vyložením $T_{MAX} = 24$ mm a tloušťka kroužku s ohledem na ekonomickou úsporu materiálu. Vyměnitelné břitové destičky byly otestovány na základě předem stanovených řezných podmínek a parametrů za pomoci metody Plánovaných experimentů. Po celou dobu testování byl zajištěn přívod procesního média do místa řezu, aby nedocházelo k tepelnému zatěžování řezné části nástroje a konstantní vyložení polotovaru $l = 110$ mm. VBD byly kontrolovány po pěti kusech upíchnutých kroužků.



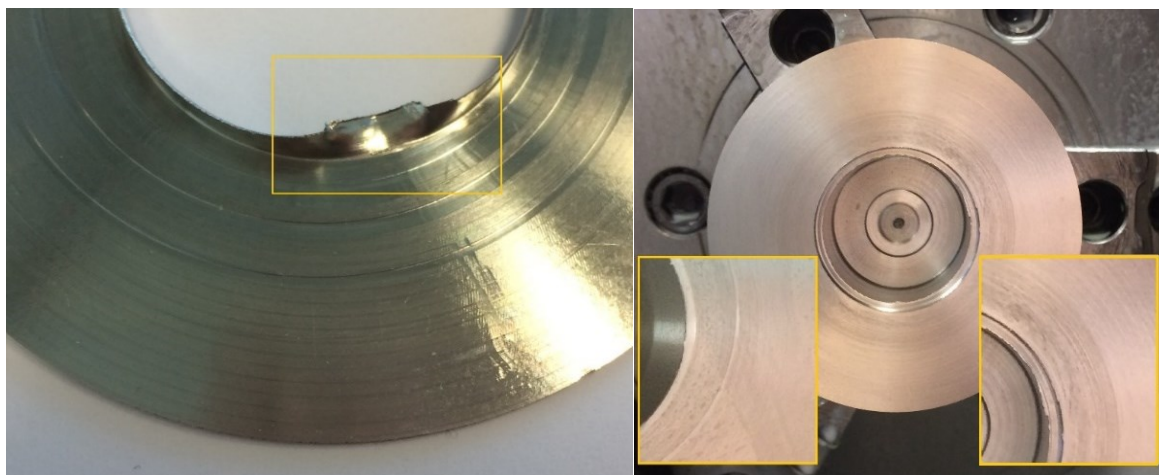
Obr. 6.1 Předvrtaný polotovar

Proces upichování byl doprovázen silným „pískáním“ bez ohledu na použité varianty VBD. S rostoucí řeznou rychlostí ($v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) docházelo k eliminaci hluku, který se projevoval až od 2/3 hloubky upichovaného kroužku. I přes zvolenou ostřejší geometrii bříty a překročení upichované hloubky o 1 mm nedocházelo k úplnému oddělení kroužku od polotovaru. V tomto případě byl materiál silou nástroje vytlačován. Mezi kroužky ulpívala tříska, viz obr. 5.13, která ovlivňovala kvalitu obrobeného povrchu. Po obvodu vnitřního průměru se tvořil otřep, který byl způsoben použitím neutrální destičky s negativní fazetkou na hlavním ostří nástroje, viz obr. 5.14 vlevo.



Obr. 6.2 Uváznutý materiál

Vzhledem k velmi malé tloušťce kroužku docházelo ke vzniku konkávního tvaru. Vlivem výjezdu nástroje ze záběru docházelo k poškození povrchu. V oblasti vnitřního průměru docházelo vlivem deformace materiálu k jeho nalepování po povrchu a vzniku rýhy po obvodu od špičky nože, viz obr. 6.3 vpravo.



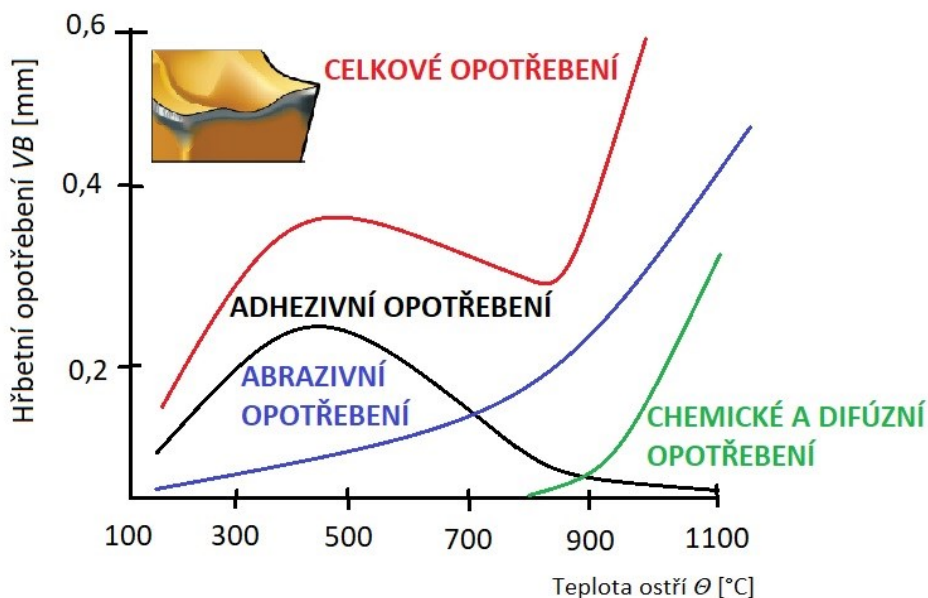
Obr. 6.3 Výsledný povrch kroužku

vlevo – vznik otřepu, vpravo – znehodnocený povrch

6.1 Opotřebení a mechanismy opotřebení

S procesem obrábění úzce souvisí opotřebení řezných nástrojů. K tomuto jevu dochází vždy, když dochází ke vzájemnému kontaktu řezného nástroje a obrobku, řezného nástroje a třísky. V případě kontaktu nástroje s obrobkem dochází k opotřebení na hřbetě nástroje a na jeho špičce. Při kontaktu mezi nástrojem a odcházející třískou vzniká opotřebení na čelní ploše nástroje. Opotřebení nástroje je výsledkem zatížení, ať už tepelného, chemického nebo mechanického, působícího na řeznou část během procesu obrábění. Opotřebení řezného nástroje vede ke změně vlastností a geometrie řezného nástroje. Kritérium opotřebení je určeno podle geometrických změn, které mohou být tolerovány na řezném nástroji. Opotřebením je myšlen trvalý úbytek materiálu, který je způsoben fyzikálními faktory. Jedná se o formy mechanismů opotřebení jako je adhezivní a abrazivní opotřebení, chemické a difúzní opotřebení nebo únava a erozní opotřebení. Bez ohledu na analyzovaný břit je nutné zajistit bezpečný a kontrolovatelný vývoj opotřebení. V případě lomu nebo vyštípnutí špičky nástroje se jedná o nepříjemný průběh ohrožující spolehlivost procesu.^{12, 14}

Klíčovými faktory během analýzy opotřebení řezných nástrojů jsou maximální teplota ostří a teplotní gradient v řezném materiálu. Tyto veličiny určují, o jaký typ opotřebení se jedná. V závislosti na teplotě ostří je působení mechanismů opotřebení odlišné, viz obr. 6.4. Omezením teploty břitu a získáním co nejvhodnějších gradientů materiálu je možné nastavit předvídatelný a hlavně bezpečný chod obrábění.



Obr. 6.4 Opotřebení nástroje s ohledem na teplotu břitu¹²

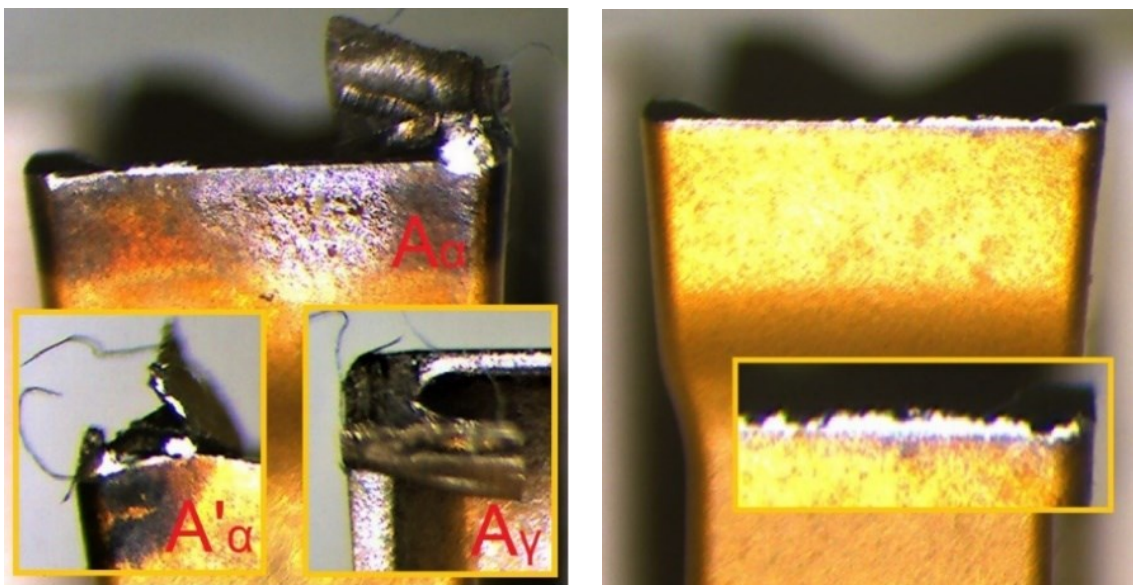
Použití moderních řezných nástrojů s pokročilými povlaky může vést k redukci zatížení, které působí na funkční plochy řezného nástroje. Klíčovými faktory při analýze opotřebení je teplota ostří

a teplotní gradient obráběného materiálu. Tyto veličiny stanovují základní druhy opotřebení, které se vyskytují na řezné části nástroje. Teplota a teplotní gradient jsou ovlivněny zejména vlastnostmi obrobku, vlastnostmi řezného materiálu a nastavenými řeznými podmínkami. Snahou je nalézt kontrolovatelný průběh opotřebení břitu, proto je důležité se zaměřit na základní formy opotřebení – *opotřebení hřbetu, opotřebení ve tvaru žlábků na čele, vrubové opotřebení, trhliny, vydrolování ostří, nárůstek a plastická deformace*. Tyto formy spolehlivě definují velikost opotřebení a trvanlivost nástroje. Díky tomu lze dosáhnout produktivního procesu i z ekonomického hlediska.

28

- **Řezné podmínky – $f = 0,08 \text{ mm}$ a $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$**

Vzhledem k vyšší tažnosti austenitické oceli docházelo k ulpívání vrstev obráběného materiálu na ostří nástroje, což způsobilo tvorbu nárůstku, viz obr. 6.5. Při nízkých řezných podmínkách, zejména řezné rychlosti, tenká vrstva materiálu pokrývala 70 % délky hlavního ostří nástroje. Následujícím přejezdem téměř vždy došlo k jeho odstranění bez poškození břitu. Se zvyšující se řeznou rychlostí docházelo k jeho redukci. Dále se v průběhu upichování objevoval na hlavním i vedlejších hřbetech abrazivní otěr. Nízké řezné podmínky, geometrie a mechanická úprava povrchu VBD měly pozitivní vliv na opotřebení řezného nástroje během upichování.

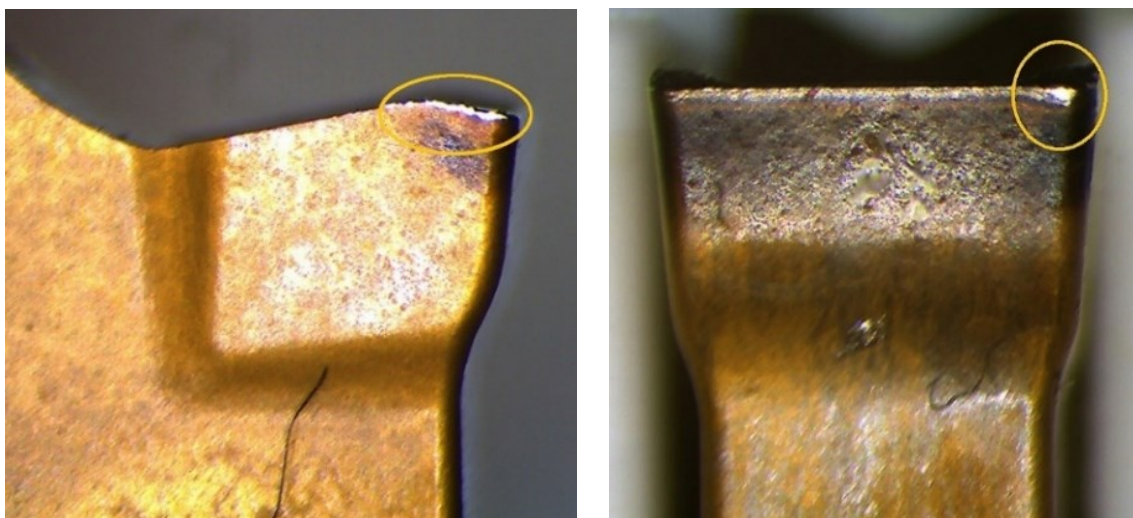


Obr. 6.5 Tvorba nárůstku za nízkých řezných podmínek

- **Řezné podmínky – $f = 0,12 \text{ mm}$ a $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$**

S vyšší hodnotou posuvu ($f = 0,12 \text{ mm}$) a nízké řezné rychlosti ($v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) bylo docíleno eliminace vzniku nárůstku na hlavním ostří nástroje. Na hlavním ostří byl zaznamenán výrazný projev abrazivního opotřebení a vedlejší ostří byla pokryta tenkou lesklou vrstvou obráběného materiálu u VBD s menším poloměrem zaoblení, viz obr. 5.17 vlevo. V důsledku vyšší koncentrace

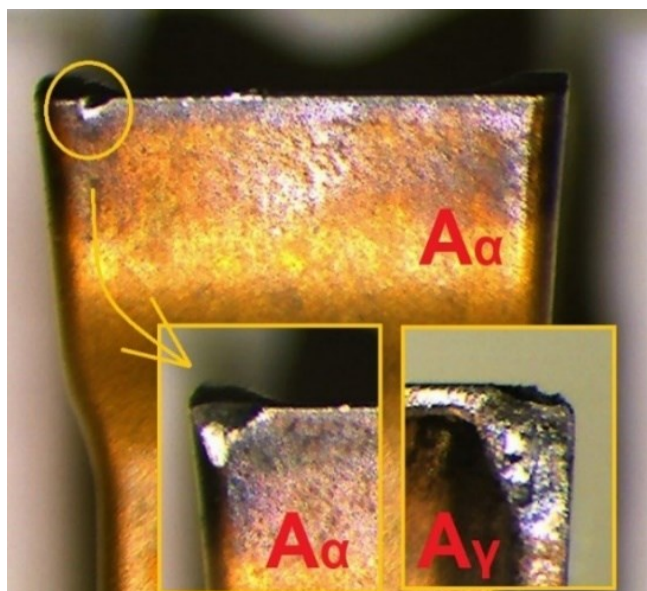
tepla v místě řezu a mechanického zatížení docházelo ke vzniku plastické deformace špičky, viz obr. 6.6 vpravo.



Obr. 6.6 Opotřebení VBD ($f = 0,12 \text{ mm}$, $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

vlevo – nárůstek na vedlejším ostří, vpravo – plastická deformace

Vyměnitelné břitové destičky s větším poloměrem zaoblení ostří měly horší řezivost a také trvanlivost. Během upichování docházelo k postupné tvorbě vrubu, který způsobil vyštípnutí špičky nástroje a předčasné ukončení testů, viz obr. 6.7. Tento průběh se projevil u leštěné i neleštěné varianty VBD.

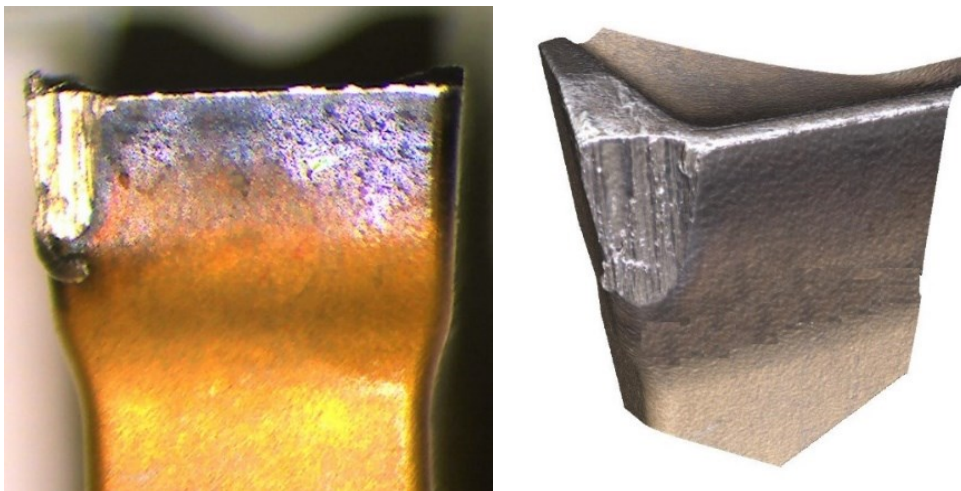


Obr. 6.7 Poškození břitu nástroje VBD

- Řezné podmínky – $f = 0,08 \text{ mm}$ a $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Vývoj opotřebení za těchto řezných podmínek byl podobného charakteru jako obrábění za nízkých řezných podmínek. Vlivem vyšší řezné rychlosti došlo ke snížení tvorby nárůstku na hlavním a vedlejším ostří. Za těchto řezných podmínek měla mechanická úprava povrchu negativní vliv

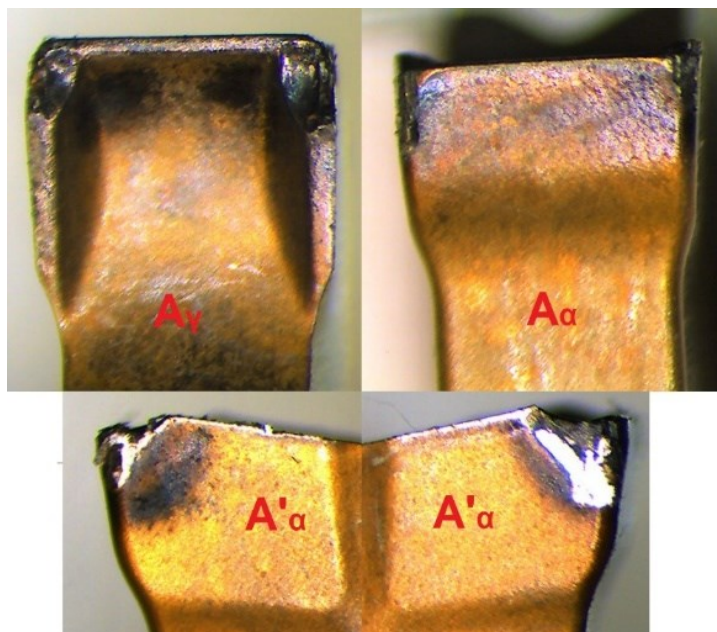
na opotřebení. U destiček s menším poloměrem zaoblení ostří a leštěné varianty s poloměrem zaoblení 40 μm docházelo ke vzniku nárůstku na vedlejším ostří. Utržením jeho nestabilní části došlo jako v předchozím případě k vyštípnutí špičky nástroje, viz obr. 6.8



Obr. 6.8 Opotřebení VBD – $r_n = 40 \mu\text{m}$ vyštípnutí špičky

- Řezné podmínky – $f = 0,12 \text{ mm}$ a $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$


Obrábění prototypovými destičkami za vysokých řezných podmínek zapříčinilo předčasné ukončení testů. Během upichování kroužků docházelo opět k tepelnému ovlivnění povlaku na hlavním a vedlejších hřbetech nástroje. Na vedlejším ostří ulpíval materiál a tvořil se nárůstek. Hlavním projevem opotřebení zde bylo vyštípnutí špičky nástroje, viz obr. 6.9. Destičky za těchto navržených podmínek vydržely podstatně kratší dobu v porovnání s ostatními kombinacemi parametrů obrábění, a to bez ohledu na leštěnou a neleštěnou variantu nebo jejich geometrii.



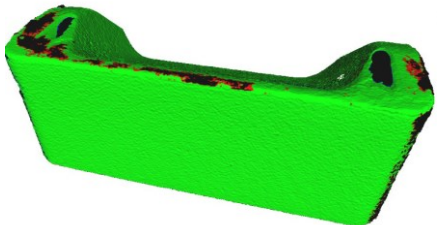
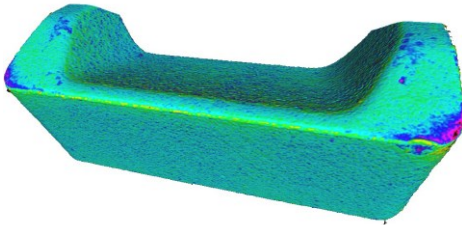
Obr. 6.9 Opotřebení VBD za vysokých řezných podmínek

Pro srovnání opotřebení břitu nástroje byly destičky obou geometrií a variant úpravy povrchu naskenovány pomocí optického mikroskopu Alicona Infinite G5 před a po procesu obrábění. Všechny destičky se upichovalo 5 ks kroužků za nejvyšších podmínek obrábění ($v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,12 \text{ mm}$). V tabulce 6.1 je zobrazen břit nástroje nové a opotřeбенý břit VBD. V poslední části tabulky je zobrazeno i diferenční porovnání nového a opotřeбенého břitu.

Tab. 6.1 Vizualní porovnání nového a opotřeбенého břitu

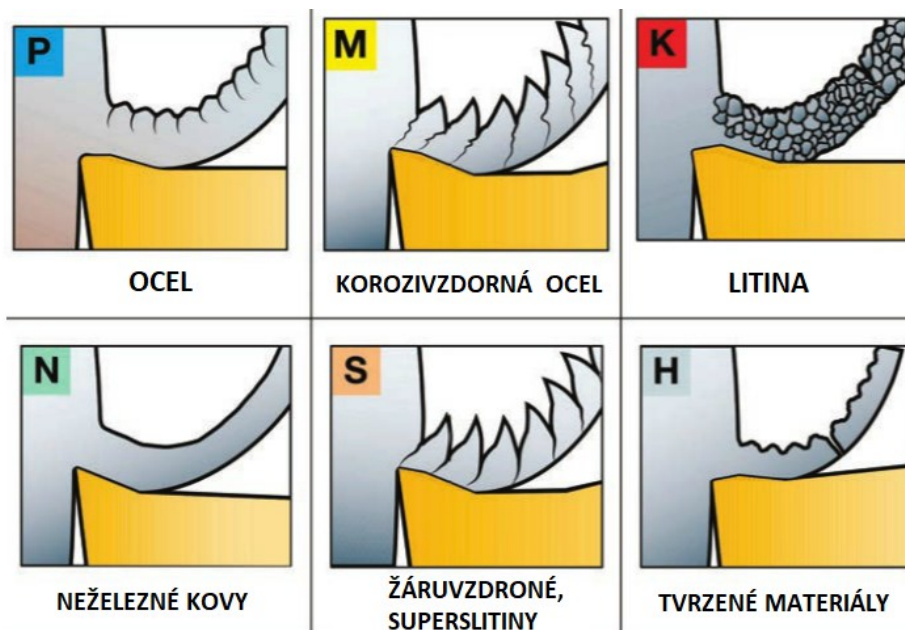
Řezné podmínky	$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$f = 0,12 \text{ mm}$	$i = 5$
Velikost zaoblení	$r_n = 40 \mu\text{m}$	Mechanická úprava	NE
			
Velikost zaoblení	$r_n = 40 \mu\text{m}$	Mechanická úprava	ANO
			
Velikost zaoblení	$r_n = 25 \mu\text{m}$	Mechanická úprava	NE
			
Velikost zaoblení	$r_n = 25 \mu\text{m}$	Mechanická úprava	ANO
			

Pokračování tabulky 6.1

Diferenciální analýza břitu řezného nástroje			
Velikost zaoblení	$r_n = 40 \mu\text{m}$	Velikost zaoblení	$r_n = 40 \mu\text{m}$
Mechanická úprava	NE	Mechanická úprava	ANO
Velikost vad	2 714 484,195 μm^2	Velikost vad	1 207 870,864 μm^2
			

6.2 Tvorba třísky a segmentace

Správný proces obrábění lze zhodnotit také na základě tvorby třísky. Správným utvářením a odchodem třísky z místa řezu lze redukovat nejen opotřebení řezného nástroje, ale zajistit i vyšší kvalitu obrobku. Působením řezného klínu dochází k oddělování materiálu obrobku v podobě třísky, která má tendenci odcházet po čelní ploše řezného nástroje, viz obr. 6.10.

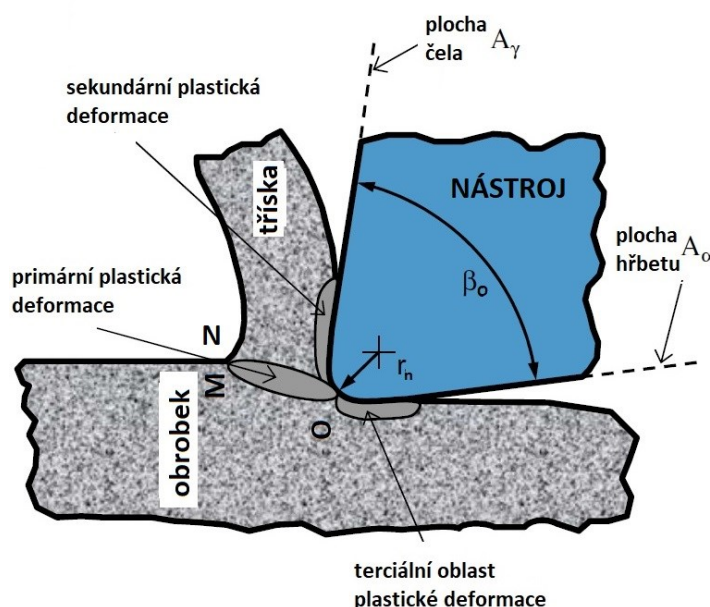


Obr. 6.10 Utváření třísky pro různé materiály¹⁶

Působením síly řezného klínu dochází k postupnému oddělování obráběného materiálu, a ke vzniku pružných a poté plastických deformací. Působením této síly se v materiálu rozvíjí velká napětí, která překonávají vnitřní síly soudržnosti a samotný odpor materiálu v celém objemu obrobku. Tlakem

řezného nástroje se zvětšují smyková napětí do té doby, dokud nedojde k plastické deformaci materiálu, která zahrnuje pouze zónu řezání. Řezný klín se stále pohybuje ve směru posuvu, plastická deformace roste a s ní dochází k pěchování jednotlivých vrstev materiálu. Oddělení materiálu a vzniku třísky je způsobeno ukončením plastické deformace.^{11, 56, 60, 82}

Plastická deformace je rozdělena na tři oblasti deformace, viz obr. 6.11 – primární plastická deformace (I), sekundární plastická deformace (II), terciální plastická deformace (III). Velikost primární plastické deformace se odvíjí od řezné rychlosti, posuvové rychlosti, geometrie řezného nástroje, řezného prostředí a od fyzikálních vlastností obráběného materiálu. Obecně platí, že s rostoucí řeznou rychlostí se oblast primární plastické deformace (oblast ohraničená body O, M, N) zužuje a zvětšuje se úhel stříhu δ .⁵⁹

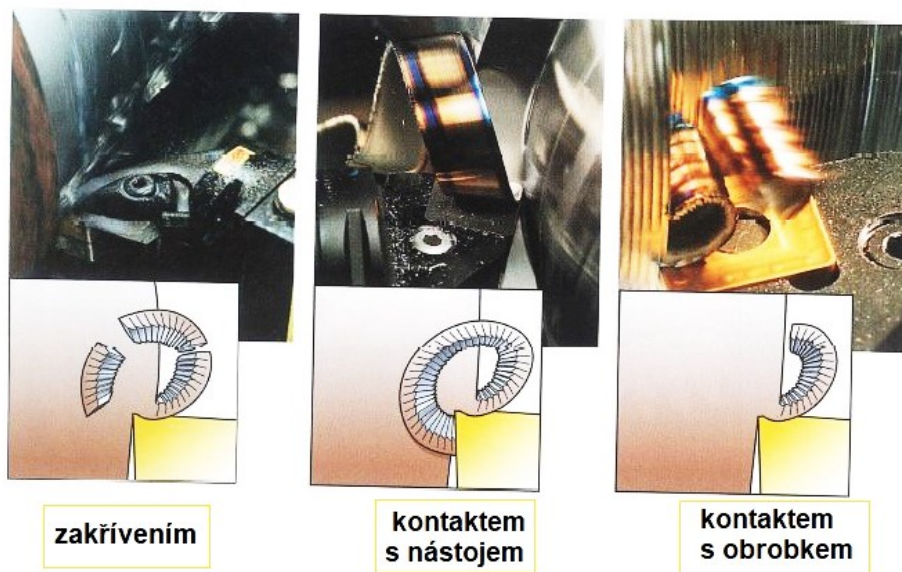


Obr. 6.11 Tvorba třísky pro konvenční obrábění²⁴

Pro vysokorychlostní obrábění je tato oblast velmi malá a body M a N mohou splývat. Během konvenčního obrábění se tříska výrazně deformuje, má tendenci se zpevňovat a její tvrdost je mnohokrát vyšší než původní materiál obrobku. Pokud by docházelo k intenzivnímu tření, vznikaly by zde adhezní síly, které by zapříčinily vznik adhezních svarů. Tyto svary za určitých řezných podmínek mohou přejít k postupnému nalepování jednotlivých vrstev až ke vzniku nárůstku. Nárůstek je charakteristický svou tvrdostí a vysokou pevností. V některých situacích má schopnost přebírat funkci řezného klínu. Rizikem při tvorbě nárůstku je možnost jeho odtrhnutí, přičemž dojde k poškození břitu řezného nástroje. Vzniklý nárůstek také mění geometrii řezného klínu. Obecně se při zvětšování úhlu hřbetu α snižuje třecí plocha mezi nástrojem a hotovým výrobkem a nedochází ke znehodnocení kvality hotového povrchu. Totéž platí pro úhel čela γ . S jeho vyšší hodnotou se snižuje řezný odpor mezi třískou a čelem nástroje, tříska lépe odchází a nevzniká tak abrazivní opotřebení na čele řezného nástroje.^{56, 82}

Typ a tvar vyprodukovaných třísek je částečně spojen s průběhem řezných sil. Pokud je výrazná segmentace třísek, pak dynamika řezných sil vede k vysokým hodnotám amplitudy pohybů řezného nástroje. Mechanismy deformace materiálu přispívají k tvorbě segmentů a k dynamice řezných sil. V prvopočátku dochází k postupnému nahromadění napětí ve smykové rovině, poté nastává uvolnění, které je zapříčiněno vznikem trhlin a rychlým stříhem. U korozivzdorných ocelí je vykazována nejvyšší míra segmentace, vzhledem k deformačnímu zpevnění v průběhu obrábění v kombinaci s poměrně nízkou tepelnou vodivostí. Segmenty třísek různých druhů vytvářejí volné svazky třísek různé velikosti a tvaru, což má negativní vliv na řezný proces.^{15, 56, 60}

Dlouhé třísky mohou ohrozit chod výroby, naopak krátké jednoduché třísky nebo spirálově tvarované třísky jsou považovány za méně problematické. Aby se předešlo problémům během obrábění, vyžadují tvárné materiály zvláštní deformaci nebo ohýbání, např. nízkolegované oceli jsou příkladem tvorby dlouhých třísek. Zde nedochází k odlamování třísek, ale pouze k jejich formování. Naopak šedá litina a některé slitiny hliníku jsou materiály, které vytvářejí krátké třísky. Odlomení třísky je podpořeno přítomností geometrie utvařeče, který kopíruje velikost čelní plochy. Odlomení třísky není vždy způsobeno zakřivením, ale kontaktem s nástrojem nebo obrobkem, viz obr. 6.12. I přes způsob odlomení je její odchod důležitý, aby se předešlo nahromadění na nástroji.^{12, 14, 15, 56}



Obr. 6.12 Odlomení třísky na základě jejího zakřivení, kontaktu s obrobkem a řezným nástrojem¹⁶

Mezi faktory, ovlivňující utváření třísky patří zejména geometrie a mikrogeometrie řezného nástroje (větší úhly čela γ , ostřejší negativní geometrie), řezné podmínky (v_c , f , a_p), kde se s vyšším posuvem budou tvořit kratší třísky. Obecně platí, že s větší hloubkou řezu za správné kombinace posuvu je zaručeno správné tvorbě třísky. Dalším faktorem mající vliv na tvorbu třísky jsou vlastnosti obráběného materiálu (tvrdost, pevnost v tahu, houževnatost, materiálové složení) a působení

procesního média. Konkrétně austenitické korozivzdorné oceli mají ve srovnání s běžnou ocelí vyšší tažnost a austenitickou strukturu, která způsobuje tvorbu delších a nepravidelných třísek.¹¹

Pro proces upichování je kladen vysoký důraz na tvorbu a odchod třísky. Při tvorbě hlubokých zápichů a procesu upichování je vytvářen zúžený prostor pro její odchod o šířce nože. Pokud se tříska správně neutváří, může poškozovat boky polotovaru a hotové součásti. Špatný odchod a nedostatek prostoru způsobuje nakumulování třísky na čelní ploše nástroje, přičemž jej silně mechanicky zatěžuje a ovlivňuje negativně stav bříty nástroje. V průběhu experimentální činnosti při upichování austenitické korozivzdorné oceli AISI 316L se měnil tvar a průřez třísky na základě řezných podmínek a parametrů obrábění. Správné utváření třísky – tvar šneku pro proces upichování je zobrazen na obrázku 6.13a.




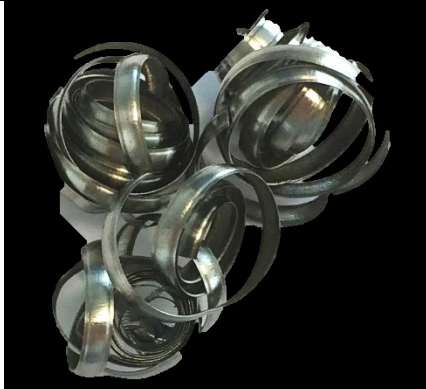
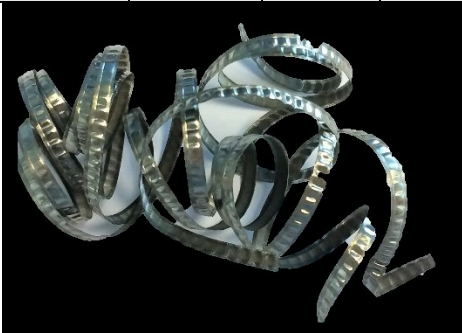



Obr. 6.13 Tvorba třísky během upichování oceli 316L

a) dobré - šnekovité utváření třísky; b) špatná – dlouhá, spirálovitá tříska

Při najetí nástroje do řezu se vždy tvořila dlouhá, spirálovitá tříska, viz obr. 6.13b, která se dobře odlamovala. Jakmile se začala vytvářet úzká drážka, došlo ke změně typu třísky zpět na šnekovitý tvar. Špatná tvorba třísky během upichování je zobrazena spolu s parametry obrábění v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 Tvorba třísky při upichování

Tvorba třísky při upichování materiálu dle W. Nr. 1.4404							
v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	úprava	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	úprava
110	0,08	25	NE	110	0,08	25	ANO
							
v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	úprava	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	úprava
110	0,12	25	NE	200	0,12	25	NE
							
v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	úprava	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	úprava
200	0,08	25	ANO	200	0,08	25	NE
							

6.3 Mikrogeometrie povrchu

Neustále je kladen vysoký důraz na integritu povrchu, zejména tvarovou a rozměrovou přesnost, s čímž úzce souvisí optimalizace řezného procesu (modifikace řezných podmínek, vývoj řezných nástrojů, vývoj obráběcích strojů, aj.) a ekologické trendy (suché obrábění). Integrita povrchu je v dnešní době vysoce sledovaným faktorem nejen v oblasti strojírenství, přičemž identifikace povrchu není vždy jednoduchá.

Pojem „Integrita povrchu“ byl představen Dr. Michaellem Field a Johnem F. Kahles v roce 1964 na sympoziu Metcut Research Associates Inc., kde byla věnována pozornost zbytkovým napětím po broušení. Poté vyšla první publikace „Úvod do integrity povrchu“. ⁸³ Přesná definice pojmu integrita povrchu neexistuje. Hudson B. ⁸⁴ ji definuje jako povrch nebo rozhraní povrchů, které je součástí systému jako náhlou změnu vlastností systému (hustota, krystalická struktura, chemické složení). V příspěvku Josefa Urbana „Integrita povrchu – základní pojmy“ ⁸⁵ je integrita definována jako vztah mezi geometrickými vlastnostmi povrchu a fyzikálními vlastnostmi, jako jsou zbytková pnutí, tvrdost a mikrostruktura materiálu. Všeobecně tento pojem lze popsat jako ucelený soubor vlastností povrchu, který predikuje užité hodnoty součástí. Jedná se o soubor charakteristik povrchu, které jsou stanoveny předchozími výrobními procesy, jsou zatíženy chemickým a tepelným účinkem a popisují výslednou kvalitu povrchu. ^{86 – 89}

Nejvýznamnějšími ukazateli kvality povrchu, které lze zařadit do pojmu „Integrita povrchu“ jsou:

90, 91

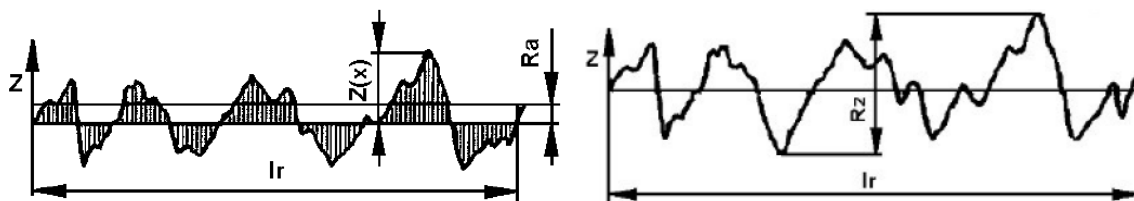
- makrogeometrie obrobené plochy – odchylky tvaru,
- mikrogeometrie obrobené plochy – drsnost povrchu,
- fyzikálně-chemické změny vlastností povrchové vrstvy – tvrdost (mikro tvrdost), zpevnění,
- zbytková napětí – směr, rozložení, druh,
- fyzikálně-chemický stav povrchu.

Mikrogeometrie povrchu je definována jako místní odchylka povrchu od jmenovité roviny. Komplexní stanovení detailní mikro-topografie technických povrchů je důležitým předpokladem pro stanovení a zlepšení kvality produktů a procesů. Nepravidelnost obrobené plochy je výsledkem procesu obrábění, který je ovlivněn několika aspekty doprovázejícími proces obrábění. Zejména mikrogeometrie obrobené plochy je určena výstupky a prohlubněmi, které slouží k jejímu vyhodnocení. Vliv na finální stav má zejména geometrie řezného nástroje, průběh plastické deformace, řezné podmínky a třecí síly v oblasti obrobené plochy. Ke změření a vyhodnocení povrchu existuje celá řada metod. Hodnocení drsnosti povrchu popisuje norma ČSN EN ISO 4287 – 1997; 4288 – 1998. ^{91, 92} Tyto normy stanovují a popisují termíny, definice, pojmy a parametry určené k vyhodnocení struktury povrchu profilovou metodou.

Pro vyhodnocení výsledků experimentální činnosti byla použita dotyková metoda, která byla přijata roku 1927. Při této metodě je zaznamenáván horizontální pohyb pohybujícího hrotu, který snímá danou topografii povrchu. Dotykovou metodou byly změřeny dva nejčastěji používané parametry drsnosti povrchu – průměrná aritmetická úchylka profilu R_a a R_z – maximální výška profilu drsnosti, viz obr. 6.14.

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (6.1)$$

$$Rz = Zp_{max} + Zv_{max} \quad (6.2)$$

Obr. 6.14 Vybrané parametry drsnosti ⁹¹

Pro měření mikrogeometrie povrchu byly nastaveny následující parametry měření:

- $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$,
- $lr = 0,8 \text{ mm}$,
- $ln = 4 \text{ mm}$.

Měření drsnosti povrchu bylo realizováno za použití dotykového drsnoměru HOMMEL etamic W5. Měřicí parametry byly nastaveny na základě normy ČSN EN ISO 4788:1998 ⁹¹ pro periodický povrch. Parametry drsnosti povrchu byly měřeny vždy na posledním kroužku pro jednotlivé parametry obrábění. Získané hodnoty parametrů Ra a Rz mohly být zatíženy hrubou chybou, která mohla vzniknout špatným provedením měření, odečtením hodnot, vadou drsnoměru, aj.

Grubbsův test extrémních odchylek je využíván pro objektivní vylučování extrémních hodnot na základě vypočteného testovacího kritéria u daného souboru dat. Pro vyhodnocení testu odlehlých hodnot bylo nutno vypočíst výběrový průměr \bar{x} a směrodatnou odchylku základního souboru dat $s_{(x)}$. Vztah níže je určen k výpočtu testovacího kritéria. Vypočtené kritérium je nutno porovnat s kritickou hodnotou získanou z tabulek s ohledem na počet naměřených dat a hladinu významnosti α^{95} .

$$H_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s_{(x)}} \quad (6.3)$$

- počet měření $n = 10$,
- hladina významnosti $\alpha^{95} = 0,05$ (95 %)
- kritická tabulková hodnota $H = 2,294$

Pokud dojde k překročení kritické hodnoty, je nutno naměřenou hodnotu vyloučit ze souboru dat a provést nový výpočet pro výběrový průměr a směrodatnou odchylku bez této hodnoty. Z důvodu velkého množství naměřených dat je zde uveden pouze vzorový výpočet pro jedno měření, který je

uveden v tabulce 5.9. Pro vyhodnocení výsledků byla vypočtena standardní nejistota typu A (u_A), B (u_B).^{94, 95}

- Výpočet výběrového průměru \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.4)$$

- Výpočet nejistoty typu A (u_A)

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.5)$$

- Hodnota nejistoty vlivu opěrné patky snímacího hrotu (u_{B1})

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{\sqrt{3}} \quad [\mu\text{m}] \quad (6.6)$$

- Hodnota nejistoty měřicího přístroje (u_{B2})

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 \quad [\mu\text{m}] \quad (6.7)$$

- Nejistota typu B (u_B)

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (6.8)$$

- Výpočet kombinované standardní nejistoty (u_c)

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (6.9)$$

- Výpočet rozšířené nejistoty U_c

$$U_c = k \cdot u_c \quad [\mu\text{m}] \quad (6.10)$$

- k – koeficient rozšíření (pokrytí)
- $k = 2$ pro 95 %

Z naměřených hodnot a jejich výpočtů nedošlo k překročení kritické hodnoty u hodnot odlehlosti jednotlivých měření. Z toho nebylo nutné odstranit hodnoty měření ze souboru dat. Statistické zpracování bylo provedeno pro všechny naměřené hodnoty. Výsledky parametrů drsnosti pro kroužky tloušťky 1 mm a 5 mm jsou uvedeny v grafech 6.15 a 6.16.

Tab. 6.3 Statistické zpracování drsnosti povrchu pro 10 měření u jednoho kroužku

Drsnost povrchu kroužku – T1									
$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		$f = 0,08 \text{ mm}$			$r_n = 25 \text{ }\mu\text{m}$			LEŠTĚNÁ	
Ra [μm]									
č. měření									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,54	0,57	0,59	0,60	0,63	0,56	0,60	0,61	0,61	0,61
$\Sigma x_i = 5,92 \text{ }\mu\text{m}$				$\bar{x} = 0,592 \text{ }\mu\text{m}$			$s_{(x)} = 0,03 \text{ }\mu\text{m}$		
Hn [μm]									
1,92	0,80	-0,09	-0,24	-1,35	1,18	-0,28	-0,83	-0,50	-0,61
$u_A = 0,01 \text{ }\mu\text{m}$		$u_{B1} = 0,01 \text{ }\mu\text{m}$		$u_{B2} = 0,02 \text{ }\mu\text{m}$		$u_B = 0,02 \text{ }\mu\text{m}$		$k = 2$	
$u_c = 0,02 \text{ }\mu\text{m}$				$U_c = 0,04 \text{ }\mu\text{m}$			Ra = (0,59 ± 0,04) μm		
Rz [μm]									
č. měření									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,55	3,75	3,70	3,63	3,63	3,56	3,73	4,15	3,63	3,56
$\Sigma x_i = 36,88 \text{ }\mu\text{m}$				$\bar{x} = 3,688 \text{ }\mu\text{m}$			$s_{(x)} = 0,18 \text{ }\mu\text{m}$		
Hn [μm]									
0,78	-0,35	-0,06	0,35	0,31	0,75	-0,23	-2,01	0,34	0,71
$u_A = 0,06 \text{ }\mu\text{m}$		$u_{B1} = 0,06 \text{ }\mu\text{m}$		$u_{B2} = 0,11 \text{ }\mu\text{m}$		$u_B = 0,13 \text{ }\mu\text{m}$		$k = 2$	
$u_c = 0,14 \text{ }\mu\text{m}$				$U_c = 0,28 \text{ }\mu\text{m}$			Rz = (3,68 ± 0,28) μm		

- Hodnocení mikrogeometrie povrchu**

Z porovnání hodnot parametrů drsnosti Ra a Rz dotykovou metodou, viz obr. 6.15, lze konstatovat, že největší vliv na kvalitu povrchu měly nejvyšší řezné parametry. Nepatrný pokles nastal při obrábění neleštěnou variantou s ostřejší geometrií. Za nízkých řezných podmínek bez ohledu na mechanickou úpravu nebo mikrogeometrii řezného nástroje se hodnoty parametrů drsnosti povrchu pohybovaly v těsné blízkosti. Zvýšení řezné rychlosti s ostřejší geometrií nástroje vedlo k utváření lepšího povrchu kroužku, a to zejména u neleštěné varianty, kde byla celkově nejlepší kvalita povrchu kroužku. Za nízké řezné rychlosti a vysokého posuvu se závislost hodnot parametrů drsnosti na parametrech upichování příliš nelišila od předchozích podmínek. Se zvýšeným posuvem byl zaznamenán nárůst hodnot parametrů Ra a Rz.

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

Ra = (0,59 ± 0,04) μm , Rz = (3,69 ± 0,28) μm

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

Ra = (0,61 ± 0,05) μm , Rz = (3,59 ± 0,28) μm

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

Ra = (0,55 ± 0,04) μm , Rz = (3,37 ± 0,29) μm

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

Ra = (0,64 ± 0,05) μm , Rz = (3,51 ± 0,28) μm

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

Ra = (0,54 ± 0,04) μm , Rz = (3,46 ± 0,27) μm

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

Ra = (0,40 ± 0,04) μm , Rz = (2,49 ± 0,20) μm

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

Ra = (0,70 ± 0,05) μm , Rz = (4,57 ± 0,38) μm

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

Ra = (0,63 ± 0,05) μm , Rz = (3,68 ± 0,28) μm

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

$Ra = (0,75 \pm 0,05) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (4,46 \pm 0,44) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

$Ra = (0,63 \pm 0,05) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (4,03 \pm 0,40) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

$Ra = (0,81 \pm 0,06) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (4,74 \pm 0,40) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

$Ra = (0,73 \pm 0,06) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (4,11 \pm 0,38) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

$Ra = (1,37 \pm 0,15) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (7,83 \pm 0,80) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

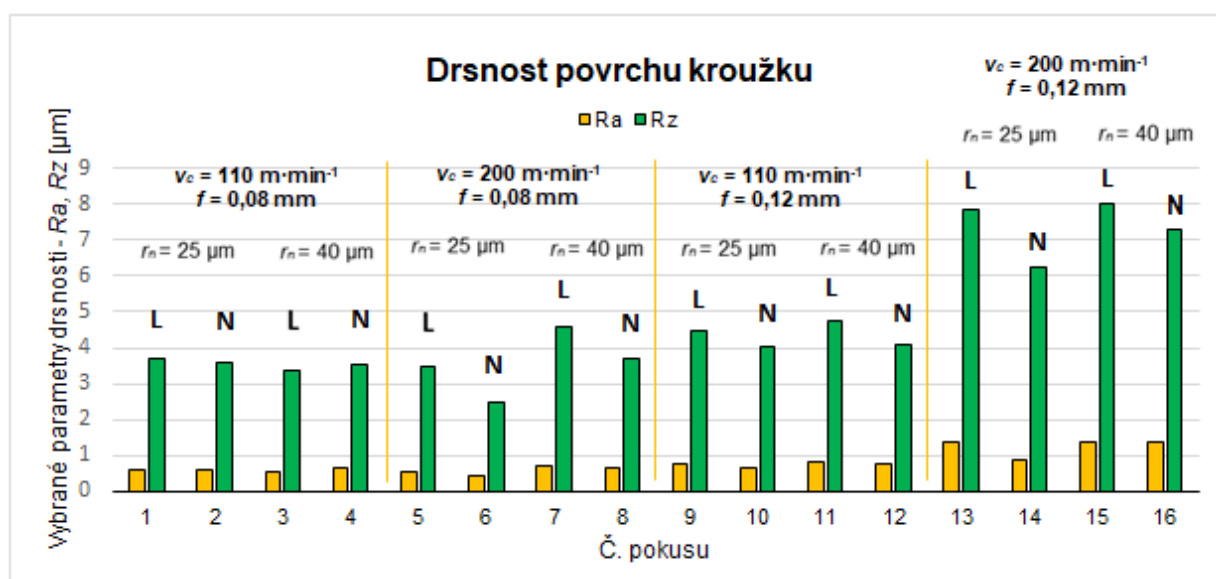
$Ra = (0,86 \pm 0,07) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (6,25 \pm 0,46) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ leštěná

$Ra = (1,37 \pm 0,18) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (8,00 \pm 0,90) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,12 \text{ mm}$, $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ neleštěná

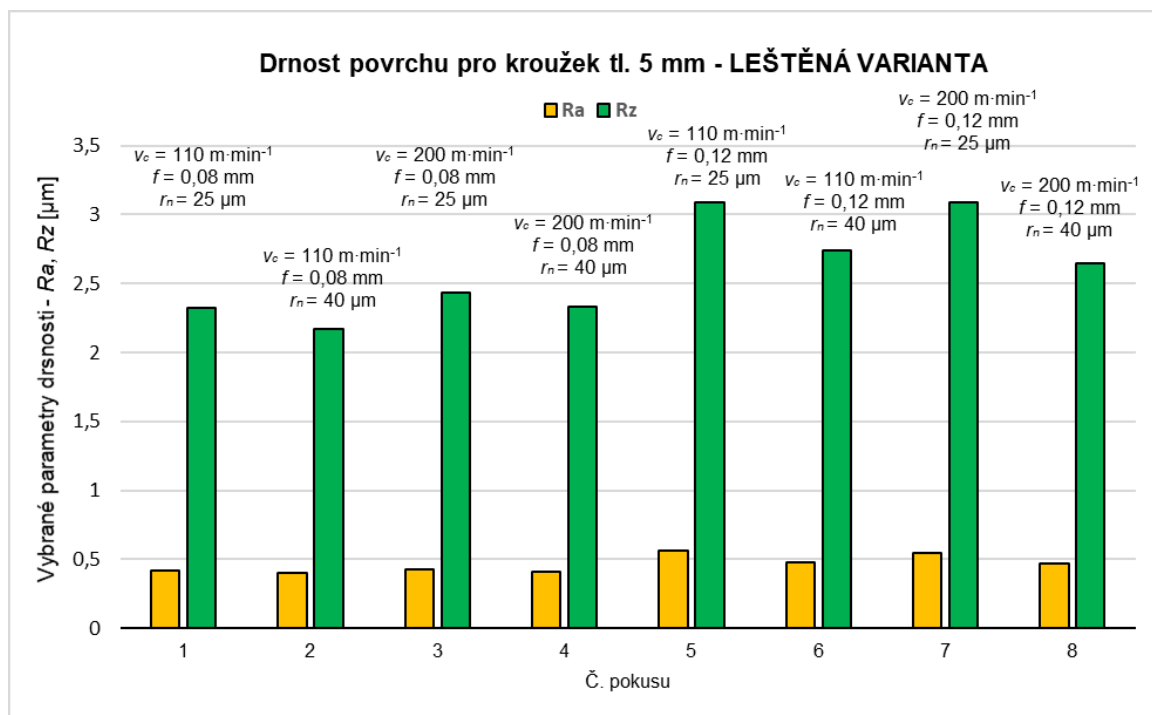
$Ra = (1,34 \pm 0,18) \text{ } \mu\text{m}$, $Rz = (7,29 \pm 0,77) \text{ } \mu\text{m}$



Obr. 6.15 Hodnocení parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz

- **Výsledky mikrogeometrie povrchu pro kroužek tl. 5 mm**

Z důvodu vyloučení vlivu tloušťky upichovaného kroužku na drsnost povrchu, bylo provedeno 8 testů, a to s leštěnými VBD pro obě geometrie za všech řezných podmínek. U tvorby povrchu silnějšího kroužku méně ostrá geometrie měla nepatrně příznivější vliv na výsledný povrch. U těchto kroužků bylo celkově dosaženo nižší hodnoty obou parametrů, a to zejména u vysokých řezných podmínek, viz obr. 6.16. Vlivem vyšší tloušťky kroužku nedocházelo k jeho prohnutí, a tudíž nástroj během výjezdu nepoškodil obrobený povrch a nevznikal nežádoucí otřep, viz obr. 6.17



Obr. 6.16 Drsnost povrchu pro kroužek tl. 5 mm



Obr. 6.17 Vizuální kontrola kroužků

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,08 \text{ mm}, r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,42 \pm 0,04) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (2,32 \pm 0,21) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,08 \text{ mm}, r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,40 \pm 0,04) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (2,17 \pm 0,49) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,08 \text{ mm}, r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,43 \pm 0,04) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (2,43 \pm 0,19) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,08 \text{ mm}, r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,41 \pm 0,04) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (2,33 \pm 0,23) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,12 \text{ mm}, r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,56 \pm 0,05) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (3,09 \pm 0,21) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,12 \text{ mm}, r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,48 \pm 0,05) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (2,74 \pm 0,31) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,12 \text{ mm}, r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,55 \pm 0,05) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (3,09 \pm 0,29) \text{ } \mu\text{m}$

$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}, f = 0,12 \text{ mm}, r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$

$Ra = (0,47 \pm 0,04) \text{ } \mu\text{m}, Rz = (2,65 \pm 0,23) \text{ } \mu\text{m}$

ZÁVĚRY

Disertační práce byla zaměřena na analýzu současného stavu upichování korozivzdorných ocelí a na návrh a hodnocení experimentální činnosti s využitím statistické metody Plánovaných experimentů. Pro proces upichování byla použita austenitická korozivzdorná ocel s označením W. Nr. 1.4404 (AISI 316L). Tato ocel se vyznačuje horší obrobiteľností, má sklony k deformačnímu zpevnění a adhezi, kvůli čemuž dochází ke zvýšenému vývoji opotřebení řezných nástrojů. Při opracování těchto materiálů je důležité dobře znát problematiku obrábění korozivzdorných ocelí, jeho negativa a nežádoucí jevy, které mohou v průběhu nastat a mít dopad na hlavně utváření třísky, opotřebení řezného nástroje, kvalitu obrobeného povrchu a na celou produktivitu procesu.

Právě z tohoto důvodu byla provedena analýza vlivu materiálu řezného nástroje, jeho geometrie, mechanické úpravy povrchu a řezných podmínek na opotřebení řezného nástroje, tvorbu třísky, vznik nežádoucích vibrací a kvalitu obrobeného povrchu při procesu upichování. Tyto vstupní proměnné byly použity jako podklady pro vybudování experimentu dle metody *DOE*. V návaznosti na to byly stanoveny cíle disertační práce.

Experimentální činnost byla realizována za předem stanovených podmínek a parametrů upichování, které vycházely z předcházejících funkčních testů. Pro experimentální testování byly použity prototypové vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu s PVD povlakem. Jednalo se o dvoubřité VBD s rovným ostřím určené pro upichovací a zapichovací operace. Celý experimentální činnost byla navržena na základě metody Plánovaných experimentů pro plně faktoriální plán 2^k . Vytyčením vstupních faktorů procesu a jejich důležitosti vedlo k nastavení dvou úrovněového plánu o čtyřech faktorech – řezná rychlost, posuv, velikost poloměru zaoblení ostří a mechanická úprava povrchu. Model upichování byl sestaven pro kombinace obou úrovní se všemi faktory při replikaci 1. Celkem bylo zrealizováno 32 testů (pokusů). Výsledkem měření – odezvou byla zvolena hodnota počtu upíchnutých kroužků Q (množství odebraného materiálu) z důvodu povahy experimentální činnosti. Naměřená data byla zpracována a vyhodnocena pomocí statistické metody v softwaru MINITAB 18. Průběh opotřebení byl zaznamenán pomocí optického dílenského mikroskopu. Opotřebení bylo sledováno na ploše hřbetu A_α a A'_α a ploše čela A_γ řezného nástroje. V průběhu obrábění bylo kontrolováno utváření a odchod třísky z místa řezu a kvalita obrobeného povrchu kroužku. Kvalita povrchu byla hodnocena pomocí dotykové metody měření vybraných parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz . Získané výsledky byly zpracovány pro objasnění problematiky procesu upichování. V závěru práce jsou uvedeny přínosy pro vědu a praxi, včetně doporučení pro další výzkum v této oblasti.

- **Zhodnocení funkčních testů procesu upichování**

Funkční testy procesu upichování byly realizovány za účelem stanovení limitních hodnot řezných podmínek. V průběhu obrábění docházelo k testování destiček za předem stanovených podmínek, a to řezné rychlosti a posuvu. Prvotní hodnoty řezných podmínek byly zvoleny na základě doporučení výrobců řezných nástrojů. Nízké řezné podmínky zabezpečily klidný průběh obrábění doprovázený tvorbou nárůstku na břitu nástroje. Z důvodu předejití tvorby nárůstku byla zvolena vyšší řezná rychlost. Na základě mikrogeometrie nástroje opatřené negativní fazetkou šířky 0,1 mm byly navrženy dvě hodnoty posuvu, a to 0,08 a 0,12 mm. Během obrábění s nižší hodnotou posuvu a vyšší řezné rychlosti byl proces stabilní s projevem abrazivního opotřebení. S vyšší hodnotou řezné rychlosti i posuvu již docházelo vlivem zatížení břitu nástroje k jeho vyštípnutí v oblasti špičky řezného nástroje. Na základě těchto projevů opotřebení byly stanoveny limitní řezné podmínky pro proces upichování korozivzdorných ocelí s předpokladem minimálního upíchnutí 60 ks kroužků.

- **Zhodnocení procesu upichování z hlediska metody Plánovaného experimentu**

Pro hodnocení plánovaného experimentu byl použit statistický software MINITAB 18. Z naměřených výsledků byla zpracována regresní analýza, která stanovuje závislosti faktorů na počtu kroužků a určuje statistickou významnost jednotlivých členů modelu a jejich kombinace.

Pro původní model se všemi faktory a jejich kombinacemi při hladině významnosti $\alpha^{95} = 0,05$ (5 %) byla potvrzena největší významnost u faktoru řezné rychlosti, posuvu a u jejich kombinace. Mechanická úprava povrchu ostří nástroje se projevila jako statisticky významná. Z pohledu dosažené trvanlivosti VBD se mechanická úprava povrchu projevila negativně. Na druhou stranu vliv velikosti poloměru zaoblení břitu nástroje nebyl statisticky důležitý. Statistickou významnost potvrdila nejen P-hodnota z dílčích testů, ale i Paretova analýza standardizovaných účinků.

Pro model byl stanoven i koeficient determinace modelu, který objasňuje kvalitu modelu, a jak moc je počet kroužků závislý na daných faktorech. Pro původní model vyšel koeficient 86,98 %. Tato hodnota uvádí, že nastavené podmínky a parametry pro tento model jsou dostačující. Zbýlých 13,02 % poukazuje na nežádoucí vlivy vstupující do procesu upichování. Tato odchylka mohla být způsobena nehomogenitou struktury obráběného materiálu a odchylkami geometrie vyměnitelných břitových destiček použitých pro testy. Proces upichování ovlivňovala i tuhost stroje a vznik nežádoucích vibrací.

Pomocí statistického programu byla provedena i analýza residuí, která stanovuje odchylku počtu upíchnutých kroužků od předpokládané hodnoty. Dosazením do regresní rovnice byly zjištěny počty predikovaných kroužků. Nízké hodnoty odchylek potvrzovaly kvalitu navrženého modelu. Velká odchylka residua se objevila u dvou pokusů pro stejné parametry obrábění, která mohla být

zapříčiněna nevhodným utvářením třísky, což vedlo k předčasnému ukončení testů z důvodu vyštípnutí špičky nástroje. Pro lepší přehled o výsledcích residuí byly sestrojeny grafy.

Pro zadaný model byly sestrojeny diagramy hlavních účinků, které stanovují průměrnou změnu počtu upíchnutých kroužků při přechodu z dolní na horní hranici za podmínek, že ostatní faktory jsou konstantní. Průběh hlavních účinků potvrdil největší vliv řezné rychlosti a posuvu během procesu upichování. V obou případech nastal strmě klesající průběh, kdy vyšší hodnota faktorů zajišťuje nižší počet upíchnutých kroužků. Zbylé dva faktory nenabývaly při testech takové významnosti jako předchozí dva. Z diagramu hlavních účinků je doporučeno pro hladší průběh obrábění korozivzdorné oceli volit břit s menším poloměrem zaoblení. Naopak mechanická úprava povrchu leštěním měla negativní vliv na počet upíchnutých kroužků, což mohlo být způsobeno ztenčením povlaku v oblasti ostří nástroje. Mechanickou úpravou povrchu leštění kartáči s polymerními vlákny a brusnou diamantovou pastou došlo k odstranění defektů a nerovností na ploše čela a hřbetu a dosažení lepší drsnosti povrchu. Použitím této technologie zároveň došlo k narušení vrstev povlaku a jejich ztenčení, čímž byla zmenšena odolnost vůči opotřebení.

Sestrojené grafy vzájemného působení dvou faktorů nepotvrdily jejich interakci a grafická závislost obou průběhů byla konstantní s nulovým úbytkem. Významná interakce se projevila v případě řezné rychlosti a velikosti poloměru zaoblení a také v případě posuvu a poloměru zaoblení ostří. Ze závislosti vyplynulo, že v kombinaci s vyšší řeznou rychlostí je vhodné použít řezný nástroj s větším poloměrem zaoblení břitu. Z hlediska většího množství odebraného materiálu je doporučeno použít nízkou hodnotu posuvu v kombinaci s větším poloměrem zaoblení břitu nástroje.

Z prvotních výsledků statistické významnosti vyšlo, že několik faktorů a jejich kombinace jsou nevýznamné a lze je z modelu vyloučit. Pro zjednodušení modelu a možnosti získat objektivnější data a informace byl model upraven odstraněním těchto členů včetně poloměru zaoblení ostří. Celý proces vyhodnocení byl zopakován včetně stanovení regresní analýzy, analýzy residuí a interpretace účinků. Z Paretova diagramu a P-hodnot zachovalých členů nového modelu lze pozorovat statistickou významnost již u všech členů. S úpravou modelu hodnota koeficientu determinace R^2 vyšla nižší, přičemž potvrdila větší množství vlivů působících na proces upichování. Vypočtená residua z regresní rovnice pro tento optimalizovaný model poukázala opět na abnormalitu a odlehlost u třech naměřených hodnot. Z porovnání residuí lze sledovat horší průběh u optimalizovaného modelu. I přes odstranění nevýznamných členů z modelu měla řezná rychlost, posuv řezného nástroje a jejich kombinace opět největší vliv na proces upichování. Diagram interakcí účinků byl podobného charakteru jako u předchozího modelu.

Pro nastavené vstupní parametry procesu upichování byla provedena optimalizace odezvy počtu kroužků Q , která vedla k nalezené vhodných podmínek pro dosažení předem stanoveného výsledku. Z tohoto kroku byl také vyhodnocen maximální možný počet upíchnutých kroužků pro zvolené parametry. S 82 % pravděpodobností je možné upíchnout 126 kroužků z materiálu s označením W. Nr. 1.4404, a to za podmínek $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ a v případě neleštěné varianty.

Z výsledků, které byly dosaženy za pomoci metody Plánovaných experimentů, lze konstatovat významný vliv řezné rychlosti v_c a hodnoty posuvu f pro proces upichování. Mechanická úprava, která se z prvopočátku jevila jako vhodná, tak potvrdila svůj negativní účinek na trvanlivost nástrojů. Z teorie obrábění korozivzdorných ocelí vyplývá, že je vhodnější použít ostřejší geometrii řezného nástroje. Avšak v případě nevhodně zvolené kombinaci řezných podmínek dochází ke snížení množství odebraného materiálu, viz kapitola 5.2.4. Pro dosažení co nejvyšší objektivit je nutné zahrnout do procesu upichování co nejvíce faktorů s vysokým vlivem na obrábění.

- **Zhodnocení z hlediska procesu upichování**

Upichování se projevilo jako nestabilní proces obrábění, který je doprovázen nežádoucími jevy. I přes velké množství chladicí kapaliny, které bylo přiváděno do místa řezu, bylo obrábění doprovázeno silným „pískáním“, a to zejména za nízkých hodnot řezné rychlosti. Po celou dobu upichování byla nastavena dostatečná hloubka řezu k zajištění úplného upíchnutí kroužku. I přes použití ostřejší geometrie VBD docházelo k silné deformaci obráběného materiálu a tvorbě otřepu před břitem nástroje. Vzhledem k tomu vznikl úzký prostor mezi dvěma kroužky, který způsobil špatné utváření, odchod třísky a uvíznutí ve vytvořené drážce.

Z ekonomických důvodů byla upichovaná tloušťka kroužku nastavena na 1 mm. Vzhledem k tomu docházelo k nepatrné deformaci tvaru, což opět ovlivnilo kvalitu povrchu. V blízkosti vnitřního průměru ulpívala po celém obvodu tenká vrstvička obráběného materiálu z důvodu nízké řezné rychlosti. Deformací tvaru kroužku se na povrchu tvořila také rýha způsobená špičkou při výjezdu řezného nástroje z místa řezu. Tato skutečnost také mohla být příčinou vyštípnutí špičky nástroje.

Při upichování korozivzdorné oceli docházelo k ulpívání tenké lesklé vrstvy materiálu a vzniku nárůstku na hlavním a vedlejších ostří řezného nástroje. Se zvyšující se řeznou rychlostí docházelo ke snížení jeho výskytu a k menšímu poškození břitu nástroje. Při nízké řezné rychlosti byl zaznamenán projev abrazivního opotřebení v podobě vrubu v blízkosti špičky nástroje u varianty destiček s větším poloměrem zaoblení ostří. Za vysokých řezných podmínek bylo docíleno výrazné snížení trvanlivosti VBD, přičemž bez ohledu na použitou geometrii nebo na mechanickou úpravu povrchu docházelo ve všech případech k vyštípnutí špičky řezného nástroje.

Obecně je obrábění korozivzdorných ocelí doprovázeno nežádoucími úkazy, které jsou dány nejen zhoršenou stabilitou technologické soustavy S-N-O-P, ale i obrobitelností obráběného materiálu. Tyto problémy se odrážejí na průběhu a intenzitě opotřebení s poklesem trvanlivosti řezných nástrojů, zhoršením kvality obrobeného povrchu. Z hlediska upichování korozivzdorných ocelí je nutno nastavit vyšší hodnotu řezné rychlosti z důvodu zamezení tvorby nárůstku a vhodnou hodnotu posuvu v závislosti na šířce negativní fazetky na břitu nástroje.

- **Zhodnocení z hlediska mikrogeometrie povrchu**

Vlivem nestability procesu, deformace tvaru kroužku, špatného utváření třísky a opotřebení řezného nástroje docházelo ke zhoršení kvality obrobeného povrchu. Pro vyhodnocení drsnosti povrchu byly vybrány dva parametry – R_a a R_z . Na kvalitu obrobeného povrchu měly největší vliv zvolené řezné podmínky. Vyšší řezná rychlost, nízký posuv a ostřejší geometrie nástroje způsobily lepší kvalitu povrchu. Pro zjištění vlivu tloušťky upichovaného kroužku na drsnost povrchu byla realizována sada několika testů. S větší tloušťkou kroužku 5 mm byla dosažena lepší kvalita obrobeného povrchu a vyšší stabilita procesu upichování.

- **Shrnutí**

Metody Plánovaných experimentů (DOE) se používají pro vytvoření statisticky navržený experiment, který na základě proměnných vlivů vstupujících do procesu strategicky navrhne a vyřeší zadaný problém. Takto navržený experiment slouží ke stanovení efektivního řešení, účinného využití vztahu příčiny a následku mezi více faktory a sledovanou proměnnou. Statistické metody se hojně vyskytují v oblasti průmyslových procesů, kde dochází k navržení procesu v prostředí proměnlivosti vstupních parametrů, subjektivních vlivů a vlivů lidí. Ve světě se metody Plánovaných experimentů využívají hlavně v Japonsku, nově industrializovaných zemích Asie a ve Spojených státech. Ve všech případech se jedná o optimalizaci procesů v technických oborech.

Použitím metody Plánovaného experimentu lze objektivněji identifikovat a optimalizovat i proces obrábění, který lze jednoznačně popsat vztahy mezi vlivnými faktory vstupující do procesu. Jeho optimalizací lze také nalézt takovou kombinaci faktorů, která povede k příznivějšímu výsledku sledované proměnné. Screeningem vybrané technologie obrábění lze rozlišit a vyzdvihnout faktory, které mají významný vliv na kvalitu a výsledek sledované odezvy. Pro první fázi testování je důležité navrhnout takové parametry obrábění (např. obrobitelnost materiálu), které zajistí kontrolovatelný, předvídatelný a bezpečný průběh procesu se zajištěním požadované hodnoty odezvy pro trvanlivost řezného nástroje nebo množství odebraného materiálu. Po objasnění nežádoucích vlivů pro stanovení žádaného výsledku lze experiment aktualizovat o další varianty.

Navržený plánovaný experiment pro plně faktoriální plán 2^k pro proces upichování korozivzdorných ocelí usnadnil stanovit váhu jednotlivých faktorů experimentu. Použitou metodou byla potvrzena významnost ostřejší geometrie řezného nástroje s menším poloměrem zaoblení pro obrábění korozivzdorných ocelí. Na druhou stranu dosažením lepší drsnosti povrchu bříty řezného nástroje leštěním se účinek nepotvrdil. Proto na základě získaných poznatků z procesu upichování korozivzdorných ocelí doporučuji metodu Plánovaných experimentů (plně faktoriální plán 2^k) použít na proces s úplnou znalostí, jehož průběh je dobře kontrolovatelný a předvídatelný.

CONCLUSIONS

The dissertation thesis was focused on an analysis of current state of parting-off of stainless steel and on a design and evaluation of experimental activity using statistical method of Design of Experiments. The austenitic stainless steel marked W. Nr. 1.4404 (AISI 316L) was used for a parting-off process. This steel is characterized by worsen machinability, it has tend to deformation and adhesion causing increase wear of cutting tools. During machining of these material it is necessary to know issue of machining of stainless steel, its negative side and unwanted effects that can become during process and have impact on mainly chip forming, wear of cutting tool, quality of machined surface and on whole productivity of the process.

Due to the analysis of influence of cutting tool material, its geometry, cutting edge preparation and cutting conditions on cutting tool wear, chip forming, creation of unwanted vibration and quality of machined surface during parting-off process was realized. These initial variables were used such as sources for building of experiment according to *DOE*. The aims of dissertation thesis were determinated in continuity of that.

Experimental activity was realized under pre-determined cutting conditions and parameters of parting-off that proceeded from previous functional tests. Prototype exchangeable cutting inserts made of sintered carbide with the PVD coating were used for experimental testing. They are two-edges inserts with straight edge be meant for parting-off and grooving process. The whole experimental activity was designed on basis of Design of Experiment for full – factorial 2^k . Defining of initial factors of process and their importance lent to setting of 2-levels plan with 4 factors – cutting speed, feed, cutting edge radius and cutting edge preparation. The parting-off model was formed for a combination of the both levels with factors and 1 replication. 32 tests (runs) were in total realized. The value of number of cut rings Q was selected as response – the results of measurement due to a character of experimental activity. The measured data were statistical processed and evaluated using statistical method at software MINITAB 18. Wear progress was detected using an optical microscope. The wear was monitored on flank rake A_α and A'_α and face rake A_γ of cutting tool. Chip forming and quality of machined surface was monitored during machining process. The surface quality was evaluated using portable surface roughness tester with measurement of selected surface roughness parameters R_a and R_z . Obtained results were processed for a clarification of parting-off process. The contribution for scientific discipline, contribution for practice and a recommendation for next research in this field are shown in the conclusion of dissertation thesis.

- **Evaluation of a functional tests of parting-off process**

The functional tests of parting-off process were realized in order to a determination of limit values of cutting conditions. During machining the inserts were tested under predetermined conditions, cutting speed and feed. First values were selected on basis of a recommendation of cutting tool producers. Low cutting conditions ensures smooth machining process accompanied by build-up-edge on cutting edge. Higher cutting speed was selected due to prevent of *BUE*. On the basis of cutting tool microgeometry with negative chamfered edge 0.1 mm were designed two values of feed – 0.08 mm and 0.12 mm. The process was stable with abrasive wear with lower feed and higher cutting speed. Edge breakage of cutting tool because of edge load was caused with higher cutting speed and feed. Limiting cutting conditions for parting-off process of stainless steel were determined on the basis of these wear manifestations with on the understanding that minimum number of rings is 60 pieces.

- **Evaluation of parting-off process from the point of view of Design of Experiment**

Statistical software MINITAB 18 was used for an evaluation of Design of Experiment. A regression analysis was processed from measured results that determine a dependence of factors on number of rings and determine statistical importance of an individual members of model and their combination.

The largest importance was confirmed for cutting speed, feed and their combination with a level of importance $\alpha^{95} = 0,05$ (5 %) for original model with all factors and their combinations. Cutting edge preparation was statistical significant. From the point of view of requirement durability had a negative impact. On the other side, cutting edge radius was not statistical significant. The statistical significance was confirmed with P-valued of part-tests, but Pareto's analysis of standardized effects.

Determination coefficient was determined for the model that clarifies a quality of model and how much is number of rings dependent on these factors. The coefficient came out 86.98 % for original model. This valued shows that set cutting conditions and parameters of the model are sufficient. Remaining 13.02 % points to unwanted effects entering to parting-off process. This deviation could be caused by non-homogeneity of machined material and cutting tool geometry deviations used for testing. Parting-off process could be influenced by toughness of machine tool and creation of unwanted vibration.

Analysis of residue that determinates a deviation of number cut rings from an expected valued was realized using statistical software. Substitution into regression equation were found out number of predicted rings. Low value of deviations confirmed the quality of designed model. Big deviation

appeared for two runs with the same machining parameters that could be cause wrong chip forming. It lent towards premature ending of tests due to edge breakage. The charts were constructed for better view.

The diagram of main effects were constructed that determined the average change of cut rings during transition from low to high border with conditions that other factors are constant. The progress of the main effects confirmed the greatest influence of the cutting speed and feed during the parting-off process. In both cases, there was a steeply decreasing course with a higher value of the factors ensuring a lower number of cut rings. The other two factors did not get as significant as the previous two in the tests. From diagram of the main effects, it is recommended to select a cutting edge with a smaller radius for smoother machining of stainless steel. In contrast, the cutting edge preparation by polishing had a negative effect on the number of cut-off rings which could be due to thinning of the PVD coating in the area of the cutting edge. Cutting edge preparation by the technology polishing with brushes with polymer fibers and diamond grinding paste eliminated defects and unevenness on the face rake and flank rake and a better surface roughness was achieved. At the same time, the use of this technology has disrupted the PVD coating layers and thinned them and wear resistance was reduced.

Constructed charts of mutual interaction of two factors did not confirm their interaction and graphical dependence of the both progress was constant with zero loss. Significant interaction was seen in the cutting speed and the cutting edge radius, and also in the case of the feed and cutting edge radius. Follow on depending on that in combination with a higher cutting speed it is suitable to use cutting tools with a larger cutting edge radius. In view of the larger amount of removed material it is recommended to use a low feed combined with a larger edge radius of cutting tool.

From first results of statistical significance came off that some factors and their combination are not significant and it is possible to remove from model. To simplify the model and get more objective data and information, the model was modified by removing these members, including the cutting edge radius. The whole parting-off process was repeated including regression analysis, residue analysis and interpretation of main effects. Statistical signification was evaluated for all members and it was confirmed by Pareto's diagram and results of the P-values for new model. Value of determination coefficient R^2 came out lower and it confirmed larger amount of impacts having an effect on parting-off process. Calculated residue from regression equation showed on abnormality and remoteness for three measured values. The comparison of residuals can be followed by a worse progress for an optimized model. Despite the removal of insignificant members from the model the cutting speed, feed and their combination had the greatest impact on the parting process. The effect interaction diagram was similar to the previous model.

An optimization of the number of rings Q was performed which led to found suitable conditions to achieve a predetermined result for the set parameters of the parting-off process. Also the maximum possible number of cut rings for the selected parameters was evaluated. It is possible to cut-off 126 rings with 82% probability from material W. Nr. 1.4404 under cutting conditions $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0.08 \text{ mm}$, $r_n = 25 \text{ } \mu\text{m}$ and in case of unpolished variant.

From the results that were achieved using Design of Experiment it is possible to pronounce the significance influence of cutting speed v_c and feed value f for parting-off process. Cutting edge preparation that appeared from the outset as suitable, confirmed its negative effect on durability of cutting tools. From the theory of machining of stainless steel shows that the most suitable is used sharper cutting edge radius. However, in the case of an unsuitably selected combination of cutting conditions, the amount of material removed is reduced, see chapter 5.2.4. To achieve maximum objectivity, it is necessary to include as many factors as possible in the parting-off process with a high impact on machining.

- **Evaluation of parting-off process from the point of view of parting-off process**

Parting-off process was unstable that was accompanied by unwanted effects. Despite the large amount of coolant that was fed to the cutting point machining was accompanied by strong "whistling", especially at low cutting speeds. Sufficient depth of cut has been set throughout the parting-off for ensuring cut-off a whole ring. Despite the use of sharper cutting insert geometry, the machined material has been severely deformed and deburred in front of the tool edge. As a result, there was a narrow space between the two rings which caused poor formation, poor chip formation and chip jamming in the groove.

The thickness of ring was set 1 mm due to economic reasons. As a result, there was a slight deformation of the shape which affected the surface quality again. A thin layer of machined material adhered around the perimeter due to low cutting speed close the inner diameter. The deformation of the shape of the ring also formed a scratches on the surface caused by the tip tool when the cutting tool left the cut. This could also be the cause of edge breakage of cutting tools.

A thin shiny layer of material adhered and a build-up on the main and secondary cutting tool flank rake formed during parting-off of stainless steel. Increased cutting speed caused its decreased occurrence and the tool tip was less damaged. A notch abrasive wear pattern close the tip of the tool was noted for a larger cutting edge radius using a low cutting speed. A significant decrease of the durability of cutting inserts was achieved under high cutting conditions, tool tip was broken irrespective of the cutting tool geometry used or the cutting edge preparation.

Generally, machining of stainless steel is accompanied unwanted effects that are given not only worsen process stability of technological system but also machinability of material. These problems are reflected in progress and intensity of wear with decrease of cutting tool durability and worsening of surface quality. From the point of view of parting-off of stainless steels it is necessary to set higher value of cutting speed because of a reduction of build-up-edge and use appropriate value of feed depending on width of negative chamfer on cutting edge.

- **Evaluation from the point of view of surface microgeometry**

Instability of process, a ring shape deformation, poor chip formation and cutting tool wear influenced the quality of machined surface. Two parameters, Ra and Rz , were selected for surface roughness evaluation. The quality of the machined surface was most influenced by the selected cutting conditions. Higher cutting speed, low feed and sharper cutting tool geometry have an effect on better surface quality. A set of several tests was performed to determine the effect of the cut-off ring thickness on the surface roughness. Better machined surface quality and higher parting-off stability were achieved with a larger ring thickness of 5 mm.

- **Summary**

Design of Experiment (DOE) are used for a creation of statistically designed experiment that strategically designs and resolves a given problems based on process variables. This designed experiment is used for a determination of effective solution, the efficient use of the cause-effect relationship between multiple factors and the variable of interest. The statistical methods occurrences in industry process area where the process is proposed in the environment of variability of input parameters, subjective influences and influences of people. In the world, Design of experiment are used in Japan, newly industrialized states of Asia and in USA. In all the cases it is optimization of process in technical field.

Using the Designed Experiment you can more objectively identify and optimize also a machining process that can clearly describe the relationships between influential factors entering the process. By optimizing it is also possible to find such a combination of factors that will lead to a more favorable result of the monitored variable. It can distinguish and highlight the factors that have a significant impact on the quality and outcome of the response by screening the selected machining technology. For the first phase of testing, it is important to design machining parameters (e.g. machinability of the material) to ensure a controllable, predictable and safe process flow with providing of the required response value for the cutting tool durability or the amount of material removed. The experiment can be updated with additional variants after clarifying the adverse effects for determining the desired result.

Designed experiment (full factorial plan 2^k) used for parting-off process of stainless steel made to determine easily an importance of individual factors of experiment. A significance of sharper cutting tool geometry with smaller cutting edge radius was confirmed using this method for machining of stainless steel. On the other side, better surface quality of cutting edge by polishing did not ensure better effect. Therefore, based on the knowledge gained from the parting-off process of stainless steels, I recommend using the Design of Experiment methods (full factorial plan 2^k) for a process with full knowledge that is well controllable and predictable.

PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBOR

- Výsledky práce a přehled současného stavu poznání v oblasti upichování mohou sloužit jako podklady pro rozšíření poznatků v oblasti upichování korozivzdorných ocelí.
- Výsledky obsažené v disertační práci mohou sloužit jako podklady pro tvorbu odborných publikací v oboru strojírenství.
- V disertační práci je objasněna analýza a metoda Plánovaných experimentu – DOE plně faktoriální plán, který lze využít jako podklad pro podobné technologie obrábění.
- Nezanedbatelným přínosem disertační práce je hodnocení opotřebení a jeho mechanismů prototypových vyměnitelných břitových destiček, analýza tvorby třísky při procesu upichování a hodnocení vybraných parametrů drsnosti povrchu při upichování austenitické korozivzdorné oceli W. Nr. 1.4404.

CONTRIBUTION FOR SCIENTIFIC DISCIPLINE

- The results and review of current state of knowledge in area of parting-off could be used as sources for extending knowledge in field of parting-off of stainless steels.
- The results contained in this dissertation thesis could be used as sources for a creation of scientific publications in engineering.
- The analysis and Design of Experiment (DOE) – full factorial plan is clarified in dissertation thesis and it is possible to use as source for similar machining technologies.
- Not negligible benefit of dissertation thesis is an evaluation of cutting tools wear and its mechanisms, analysis of chip forming during parting-off process and an evaluation of selected surface roughness parameters during parting-off process of austenitic stainless steel W. Nr. 1.4404.

PŘÍNOSY PRO PRAXI

- Výsledky mohou být použity v rámci výroby z korozivzdorné oceli.
- Umožňuje se podrobněji dostat k problematice upichování s ohledem na tvorbu třísky, volbu řezných podmínek a kvalitu obrobeného povrchu.
- Na základě použité metody Plánovaných experimentů lze zanalyzovat jakýkoliv proces obrábění bez ohledu na materiál, řezné nástroje apod.
- Výsledky vedou k ekonomické úspoře v oblasti trvanlivosti a životnosti řezných nástrojů.
- Výsledky mohou být použity u výrobců řezných nástrojů pro analýzu procesu obrábění.
- Výsledky mohou být použity do vývoje a testování řezných nástrojů společnosti DORMER Pramet s.r.o.

CONTRIBUTION FOR PRACTICE

- The results could be used within a production of stainless steel.
- It ensures in detail to come to a problem of parting-off with regards on chip forming, choice of cutting conditions and a quality of machined surface.
- On a basis of used Design of Experiment it is possible to analysis whatever machining process regardless of material, cutting tools etc.
- The results lead to economic savings in durability and tool- life of cutting tools.
- The results could be used for an analysis of machining process with producers of cutting tools.
- The results could be used for development and testing of cutting tools of DORMER Pramet Ltd.

DOPORUČENÍ NA DALŠÍ VÝZKUM

- Rozšíření experimentů o více faktorů a jejich úrovní vstupujících do procesu upichování.
- Měření a vyhodnocení silového zatížení soustavy a vibrací při upichování těžkoobrobitelných materiálů.
- Experimentální testování řezných nástrojů při jiném typu upnutí – planžeta.
- Experimentální navržení procesu pro upichování do plného materiálu.
- Plánování experimentů na základě metody Plánovaných experimentů pro jiné operace obrábění.
- Hodnocení tvorby třísky, opotřebení a jeho mechanismů a kvality obrobeného povrchu při upichování jiných uhlíkových ocelí (např. W. Nr. 1.2343, W. Nr. 1.1191).

RECOMMENDATION FOR FURTHER RESEARCH

- Extending of experiment with multiple factors entering and their levels to parting-off process.
- Measurement and evaluation of dynamic load and vibration during parting-off of hard-machined materials.
- Experimental testing of cutting tools with a different clamping system – a blade.
- Experimental process design for parting-off for full material.
- Design of Experiment for different machining process.
- An evaluation of chip forming, wear and its mechanism and quality of machined surface during parting-off process of carbon steel (e.g. W.Nr. 1.2343, W. Nr. 1.1191).

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Walter Cut. *Parting off experts: Product Handbook*. 2017.
- [2] SANDVIK Coromant. *Training Handbook: Metal cutting technology*. Švédsko: Sandvik Coromant, 2018.
- [3] LEWIS, S. Time to part. *Cutting tool engineering* [online]. Sandvik: Sandvik Coromant, 2013 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/time-part>
- [4] SANDVIK Coromant. *Příručka obrábění - kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-972-2994-6.
- [5] Řešení problémů při upichování a zapichování. *Sandvik Coromant* [online]. Švédsko: SANDVIK Coromant, 2018 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/partinggrooving/pages/troubleshooting.aspx>
- [6] BUENO-MARTINEZ, C. Nástroje a strategie použití pro upichování a zapichování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/novinka/nastroje-a-strategie-pouziti-pro-upichovani-a-zapichovani.html>
- [7] Upichovací a zapichovací systémy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, vol. 4, n. 26 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/upichovaci-a-zapichovaci-systemy.html>
- [8] Cutting Tool Applications: Grooving and Threading. *AMERICAN MACHINIST* [online]. United States of America, 2010 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://americanmachinist.com/cutting-tools/cutting-tool-applications-chapter-6-grooving-and-threading>.
- [9] HOFFMAN, P. J. et al. *Precision machining technology*. 2nd ed. New York: Cengage Learning, 2012, p. 762, ISBN 978-1-2854-4454-3.
- [10] SMITH, G. T. *Cutting tool technology: industrial handbook*. London: Springer, c2008, s. 589. ISBN 978-1-84800-204-3.
- [11] DE VOS, PATRICK. *Příručka pro technology – Jak rozpoznat správné utváření třísek?* [online]. MM Průmyslové Spektrum: MM Průmyslové Spektrum, 2012, vol. 2012, n. 4, s. 80 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
- [12] DE VOS, PATRICK a Jan-Eric STAHL. *Aplikovaná fyzika v obrábění kovů: praktické zkušenosti*. Švédsko, 2016, 171 s. Učebnice. SECO TOOLS AB.
- [13] *PRAMET: přehled utvařečů pro měření řezných sil při zapichování*. 2018, 12 s. [cit. 2019-02-18]. Šumperk.
- [14] DE VOS, PATRICK a JAN-ERIC STAHL. *Opotřebení řezných nástrojů: praktické zkušenosti*. Švédsko, 2015, 168 s. Učebnice. Univerzita v Lundu.

- [15] DE VOS, PATRICK a Jan-Eric STAHL. *Metal cutting: Theory and practice*. Švédsko, 2014, 184 s. Učebnice. SECO TOOLS AB.
- [16] TRAINING HANDBOOK: Metal cutting technology. *SANDVIK Coromant*. 2017, 391 s. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: http://sandvik.ecbook.se/se/en/training_handbook/.
- [17] Parting and Grooving. *SANDVIK Coromant* [online]. Česká republika, 2016 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting_grooving
- [18] Příručka obrábění: 2004. *Dormer Pramet s.r.o.* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.isstechn.cz/objekty/prirucka_obrazeni.pdf
- [19] MDT - Multi-directional Turning and Grooving. *Seco Tools* [online]. Švédsko: Seco Tools, 2014 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/m_7116.
- [20] Upichování v ose Y: Upichování se vydává novým směrem. *SANDVIK Coromant* [online]. Švédsko: Sandvik Coromant, 2017 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-1040-194.pdf>
- [21] DGNC – A new parting insert with direct jet cooling. *Iscar*. [online]. UK: Iscar, Ltd, [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Products.aspx/CountryID/1/ProductId/45>
- [22] CEP R., S. MALOTOVA, T. ZLAMAL, V. VRBA a M. BORZAN Tracking of the development wear of cutting tools with different geometry during parting-off. *MTeM - AMaTUC 2017: 13th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing*, Romania, 2017, Vol. 137, 22, p. 8. ISBN: 978-275989027-9. DOI: 10.1051/mateconf/201713703003.
- [23] ZLAMAL T., I. MRKVICA, S. MALOTOVA, O. VORTEL a T. VOPAT. Effect of cutting tool microgeometry on the aluminium alloy machining process. *MM Science Journal*, 2019, vol. X, n. Y, 5 s. ISBN: 180XXXXX
- [24] KLOCKE, F. *Principles of Cutting: simulation techniques in manufacturing technology*. Německo, 2016, 80 s., přednáška 6. Fraunhofer IPT.
- [25] ZLAMAL T., J. PETRU, S. MALOTOVA, R. CEP a J. HAJNYS. The influence of microgeometry of cutting tool on dynamic load of system. In: *METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: Tanger, 2018, 1795-1800 s. ISBN 978-808729484-0.
- [26] RODRIGUÉZ, C. J. C. *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing*. 1. Německo: Kassel University, 2009, 205 s. ISBN 978-3-89958-712-8.
- [27] ZLAMAL T., MALOTOVA, S., SZOTKOWSKI, T., CEP, R., Marinescu, I.D. The Geometry of Grooving Tool and Its Influence on Dynamic Load System for Turning. In: *TRANSCOM 2019 - 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*. Nový Smokovec, Vysoké Tatry, Slovensko: 2019, 8 s.
- [28] Příručka pro technology – Obrobitelnost nerezových ocelí. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2012 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z:

- <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost-nerezovych-oceli.html>
- [29] Korozivzdorné oceli – vlastnosti. In: *Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften* [online]. Německo: Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 2002, s. 1-28 [cit. 2019-02-11]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf.
- [30] Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi. *Italinox: partner, který nerezaví* [online]. Česká republika: italinox, 2015 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [31] Stainless steel for machining: Designer Handbook. *Speciality steel industry of North America* [online]. Washington, USA, 2007 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: http://www.ssina.com/download_a_file/machining.pdf.
- [32] YOUSSEF, H. A. *Machining of stainless steels and super alloys: traditional and nontraditional techniques*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2016, p. 275. ISBN 978-1-118-91956-9.
- [33] STRNAD, T. *Obrobitelnost austenitické ocele: podklad k předmětu KTO/EMO* [online]. Plzeň, 2011, Skripta. Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/22585612-Fakulta-strojni-katedra-technologie-obrabeni.html>.
- [34] Příručka pro technology: Proces obrábění v nerezových ocelích – závěrečné tipy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2012 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-v-nerezovych-ocelich-zaverecne-tipy.html>
- [35] Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2008 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-tezkoobrobitelnych-materialu.html>
- [36] Obrobitelnost nerezových ocelí. *KONSTRUKCE: odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2013 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/obrobitelnost-nerezovych-oceli/>.
- [37] Příručka pro technology – Obrobitelnost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2011 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>
- [38] PŘIBIL, E. a kol. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli Poldi a jejich použití*. Kladno: Poldi Spojené ocelárny, N.P. Kladno, I. díl. 1989. ISBN: 06-037-89.
- [39] Moderní obrábění nerezových ocelí. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2003 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-obrabeni-nerezovych-oceli.html>

- [40] Obráběné materiály: Korozivzdorné oceli. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx#top>
- [41] GRAHAM, D. Best Practices for Austenitic Stainless Steel (ISO M) Machining. *SECO - cutting edge conversation* [online]. 2014 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <http://cuttingedgeconversation.blogspot.com/2014/07/best-practices-for-austenitic-stainless.html>
- [42] General principles of machining stainless steels. *BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION* [online]. United Kingdom: BSSA Regus, 2018 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=192>.
- [43] Machining Hard Material. *Autodesk* [online]. USA: Autodesk, 2019 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/industry/manufacturing/resources/manufacturingengineer/machining-hard-material>.
- [44] CIFTCI, I. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*. 2006, vol. 39 no. 6, s. 565-569. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.05.005. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X05001684>.
- [45] ABOU-EL-HOSSEN, K.A. a YAHYA, Z. High-speed end-milling of AISI 304 stainless steels using new geometrically developed carbide inserts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, vol. 162-163, s. 596-602. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.129. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605002372>.
- [46] FERNÁNDEZ-ABIA, A. I. et al. Behavior of austenitic stainless steels at high speed turning using specific force coefficients. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, vol. 62, no. 5-8, s. 505-515. DOI: 10.1007/s00170-011-3846-9. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3846-9>.
- [47] DAVIM, J. P. *Machinability of Advanced Materials*. Hoboken, NJ: ISTE Ltd/John Wiley, 2014, s. 256. ISBN 978-1-848-21396-8.
- [48] KALADHAR, M. K. et al. Machining of austenitic stainless steels - a review. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* [online]. 2012, vol. 12, no. 1,2, s. 178 - 192. [cit. 2019-02-11]. DOI: 10.1504/IJMMM.2012.048564. ISSN 1748-5711. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=48564>.
- [49] TEKINER, Z. a S. YESILYURT. Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*. 2004, vol. 25, no. 6, p. 507-513. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.12.011. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306903002632>.
- [50] MUNOZ-SANCHEZ, A. et al. The influence of tool wear in surface integrity when machining austenitic stainless steel. *DYMAT 2009 - 9th International Conferences on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*. Les Ulis, France: EDP Sciences, 2009, vol. 2. no. 2009, s. 1823 - 1829. DOI: 10.1051/dymat/2009256. ISBN 978-2-7598-0473-3. Dostupné také z: <http://www.dymat-proceedings.org/10.1051/dymat/2009256>.

- [51] ENDRINO, J. L. Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2006, vol. 200, no. 24, s. 6840-6845. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.030. ISSN 02578972. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897205011850>.
- [52] KORKUT, I. et al. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*. 2004, vol. 25, no. 4, p. 303-305. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.10.011. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306903002292>.
- [53] YONTAR, A. A. Investigation to Effects of Cutting Parameter on Tool Wear, Tool Life and Machinability in Machining Operation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED SCIENCE ENGINEERING & MANAGEMENT*. 2017, vol. 3, no. 3. ISSN 2454-9940.
- [54] ALABDULLAH, M. et al. Impacts of Wear and Geometry Response of the Cutting Tool on Machinability of Super Austenitic Stainless Steel. *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2016, 2016, s. 1-9. ISSN 2356-7023. Dostupné také z: <https://www.hindawi.com/archive/2016/7213148/>
- [55] Austenitická korozivzdorná ocel.: Technická příručka. *Bolzano oceli* [online]. Česká republika: Bolzano, 2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crnimoti17-12-2-austeniticke>
- [55] O'SULLIVAN, D. a M. COTTERELL. Machinability of austenitic stainless steel SS303. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, vol. 124, n. 1-2, 153-159 s. [cit. 2019-04-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602001978>
- [56] DE VOS, P. *Obrábění nerezových ocelí: příručka pro technology*. Švédsko, 2012, 18 s. Příručka pro technology. SECO TOOLS AB.
- [57] DMG MORI. *CNC univerzální soustruh NLX 2500MC/700*. [Online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://cz.dmgmori.com/products/lathes/universal-lathes/nlx/nlx2500+700>.
- [58] ČSN ISO 513. Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostřím – označování skupin a podskupin použití. Český normalizační institut. Praha 02/2006.
- [59] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [60] BRYCHTA, J. et al. *Technologie II - 1. díl*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [61] TAEGUTEC. *Výroba VBD a druhy povlaků*. 2008, 8 s. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrazeni.php
- [62] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část*. Brno, 2003. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT Brno, FSI, ÚST.

- [63] MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 9. USA: Wiley, 2017, 640 s. ISBN 978-1-119-32093-7.
- [64] CONDR, L. W. *Reliability Improvement with Design of Experiments*. 2. vydání. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 1991. ISBN 33487-2742.
- [65] DOE - průmyslový experiment. *Interquality* [online]. 2019 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.interquality.cz/INTERN%C3%8DKURZY/DOEInterquality/tabid/79/Default.aspx>
- [66] SIEBERTY, K. a VAN BEBBER, D., HOCHKIRCHEN, T. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg: WMX Design, 2010. ISBN 978-3-642-05492-1.
- [67] KLEPPMANN, W. *Veruchsplanung: Produkte und Proyosse optimieren*. 7. Vídeň: Calr Haneer Verlag Munchen Wien, 2011. ISBN 978-3-446-42774-4.
- [68] LAHAYE, P. et al. Using a design of experiment method to improve KDP crystal machining process. In.: *3rd International Conference on Solid-state Lasers for Applications to Inertial Confinement Fusion : SSLA - ICF*, USA, 1999, s. 814-820.
- [69] YADAV, P. Taguchi Method Based Optimization for Surface Roughness in Drilling Operation of EN-31 Steel Material and DOE Approach. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2015, vol. 6, no. 6, s. 1-6. ISSN 2229-5518.
- [70] DITTRICH, M. Process Analysis of Water Abrasive Fine Jet Structuring of Ceramic Surfaces via Design of Experiment. *Procedia CIRP*. 2014, vol. 14, s. 442-447. ISSN 22128271. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114001735>
- [71] YANG, K-Y. et al. Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, no. 9, s. 4395-4400. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013608007620>.
- [72] HLAVASEK, R. *Statistické plánování experimentů pro účely optimalizace kvality*. Brno, 2009, 62 s. Diplomová práce. VUT Brno, FSI, ÚST. Vedoucí práce Radovan Novotný.
- [73] KLIMESOVA, E. *Využití metody plánování experimentů (DOE) k optimalizaci analytické metody vodohospodářské laboratoře*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce Tošenovský J.
- [74] MICHALEK, J. *Navrhování a vyhodnocování experimentů DOE: učební texty k semináři*. Brno, 2010. Učební texty. VUT Brno.
- [75] ČSN ISO 3534-3. *Statistika – slovník a značky. Část 3: navrhování experimentů*. ÚNMZ, 2001.
- [76] TOSENOVSKY, J. *Plánování experimentu*. Ostrava, 2012. Učební texty. VŠB-TU Ostrava.
- [77] DOHNAL, G. *Základy navrhování průmyslových experimentů DOE: Úvod, analýza procesu*. Ústav technické matematiky: Stochastické metody ve strojírenství. ČVUT Praha, 2011.
- [78] DAVIM, J. P. *Design of Experiments in Production Engineering*. 1. Švýcarsko: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-23837-1.

- [79] OEHLERT G. W. *A first course in design and analysis of experiments*. 1. New York: W.H. Freeman, 2010, 679 s. ISBN 07-167-3510-5.
- [80] SCHMIDT S.R. a R.G. LAUNSBY, *Understanding Industrial Designed Experiments*, AIR ACADEMY PRESS, Colorado Springs, 1994.
- [81] T.P. RYAN. *Statistical Methods for Quality Improvement*, JOHN WILEY & SONS, New York, 1989.
- [82] ZLÁMAL T. *Příspěvek k obrábění Ni superslitin a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce: Čep R.
- [83] KŘÍŽ A. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*. Plzeň, 2010, 29 s. Přednáška, ZČU Plzeň. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf.
- [84] HUDSON B. *Surface science: an introduction*. New York: J. Wiley, 1998. ISBN 0471252395.
- [85] URBAN J. *Integrita povrchu – základní pojmy* [cit. 2015-06-14] Dostupné na WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/download/Integrita_Urban1.pdf>.
- [86] PAGAC M., S. MALOTOVA, T. ZLAMAL, J. PETRU a J. KRATOCHVIL. Evaluation of Chosen Parameters of Surface Roughness (Microgeometry) on the Samples from Stainless Steel 316L and Manufactured by the Additive Technology SLM. In: *26th International Conference on Metallurgy and Materials (METAL)*. Ostrava: Tanger, 2017, p. 956-961. ISBN 978-80-87294-79-6.
- [87] KOČMAN K. *Technologické procesy obrábění*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati. 2011. ISBN: 978-80-7204-722-2.
- [88] DAVIM J. P. *Surface integrity in machining*. London: Springer, 2009. 717 s. ISBN 184882873X.
- [89] NOVÁK Z. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. MM Průmyslové spektrum [online]. 16. 11. 2004, [vid. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>.
- [90] BÁTORA B., V. VASILKO. *Obrobené povrchy – technologická dedičnost, funkčnost*. Trenčín, Slovenská republika: Trenčínská Univerzita v Trenčíne v spolupráci s vydavateľstvom GC Tech, 2000. ISBN 80-88914-19-1.
- [91] TICHÁ Š. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X
- [92] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1. ÚNMZ, 1999.
- [93] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1. ÚNMZ, 1999.

- [94] Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *AUTOMA – časopis pro automatizační techniku*, 2001, č. 7–8, s. 50-54. ISSN 1210-9592.

- [95] Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *AUTOMA – časopis pro automatizační techniku*, 2001, č. 10, s. 52-56. ISSN 1210-9592.

VLASTNÍ PUBLIKACE

- I. **MALOTOVA S.**, R. CEP, L. CEPOVA, J. PETRU, D. STANCEKOVA, L. KYNCL a M. HATALA. Roughness Evaluation of the Machined Surface at Interrupted Cutting Process. 2016, *Manufacturing Technology*, vol. 16, n. 1, s. 168-173, ISSN: 12132489.
- II. CEPOVA L., D. SOKOVA, **S. MALOTOVA**, B. GAPINSKI a R. CEP. Evaluation of cutting forces and surface roughness after machining of selected materials. 2016, *Manufacturing Technology*, vol. 16, n. 1, s. 16, ISSN: 12132489.
- III. PAGAC M., **S. MALOTOVA**, M. SADILEK, J. PETRU, T. ZLAMAL a J. KRATOCHVÍL. Influence of Effective Milling Strategies on the Residual stress. In: *METAL 2016 : 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, May 25th-27th 2016, Hotel Voroněž I, Brno, Czech Republic, EU, Tanger*, 2016, s. 819-824, ISBN 978-80-87294-67-3. - **WoS**
- IV. CEP R., L. KYNCL, **S. MALOTOVA**, J. PETRU, T. ZLAMAL a. CZAN. Testing Ceramics Inserts at Irregular Interrupted Cut on Material 14MoV6. *Engineering Review*, University of Rijeka, 2017, s. 67-73, ISSN 1330-9587. - **WoS**
- V. PAGAC M., **S. MALOTOVA**, T. ZLAMAL, J. PETRU a J. KRATOCHVIL. Evaluation of Chosen Parameters of Surface Roughness (Microgeometry) on the Samples from Stainless Steel 316L and Manufactured by the Additive Technology SLM. In: *METAL 2017 - 26th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger, 2017, S. 956-961. ISBN 978-80-87294-79-6. - **WoS**
- VI. CEP R., **S. MALOTOVA**, T. ZLAMAL, V. VRBA a M. BORZAN. Tracking of the development wear of cutting tools with different geometry during parting-off. In: *MTeM - AMA TUC 2017: 13th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing*, Romania, 2017, Vol. 137, 22, S. 8. ISBN: 978-275989027-9. DOI: 10.1051/matecconf/201713703003. - **WoS**
- VII. MUSIL V., M. SADILEK, R. CEP, **S. MALOTOVA**. The Influence of Cutting Parameters on Surface Quality and Nitrogen Consumption During Laser Cutting. *MM Science Journal*. 2018, vol. 02, s. 2363-2366. ISSN 18031269.
- VIII. CEP R., **S. MALOTOVA**, J. KRATOCHVIL, D. STANCEKOVA, A. CZAN a T. JAKAB. Diagnosis of machine tool with using Renishaw ball-bar system. In: *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 157, 01006-. ISSN 2261-236X.
- IX. CZAN A., J. HOLUBJAK, I. DANIS, J. MARTINEK, M. MIKLOS, R. CEP, M. HATALA a **S. MALOTOVA**. Analysis of residual stress in subsurface layers after precision hard machining of forging tools. In: *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 157, S. 01005-. ISSN 2261-236X.
- X. STANCEKOVA D., J. PETRU, J. SVOBODOVA, I. MITURSKA, **S. MALOTOVA**. The Application of Grinding of Ceramic Materials. *Materials Science Forum*. 2018, vol. 919, s. 215-221. ISSN 1662-9752.
- XI. **MALOTOVA S.**, R. CEP, T. ZLAMAL, P. MOHYLA, A. CZAN, A. ATIC, I. BUDAK a L. MIRCEA. Evaluation of Residual Stresses after Irregular Interrupted Machining. *TECHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE*, 2018, vol. 25, n. 4, s. ISSN 1330-3651 (online: 1848-6339). IF 0,723, DOI: 10.17559/TV-20160615125650. – **WoS IF 0,686**
- XII. CEP R., **S. MALOTOVA**, K. KOURIL, L. CEPOVA, L. KYNCL, M. SAJGALIK a T. CZANOVA. Evaluation of Residual Stress in Conditions of Irregular Interrupted Cut. *MM Science Journal*. 2018, vol. 2018, n. 3, s. 2436-2440. DOI: 10.17973/MMSJ.2018_10_201804. ISSN 18031269. Dostupné také z: <http://www.mmscience.eu/october-2018.html#201804>.
- XIII. **MALOTOVA S.**, R. CEP, J. KRATOCHVIL, M. SAJGALIK a. CZAN. Dependence of the Resistance of the Integrated Layers on the Wear of Ceramic Cutting Tool. *Manufacturing Technology*. 2018, vol. 18, n. 3, s. 444-448. DOI: 10.21062/ujep/119.2018/a/1213-2489/MT/18/3/444. ISSN

12132489. Dostupné také z: https://arl.ujep.cz/arl-ujep/cs/detail-ujep_us_cat-0263169-Dependence-of-the-resistance-of-the-integrated-layers-on-the-wear-of-ceramic-cutting-tool/
- XIV. CEP R., **S. MALOTOVA**, J. LICHOVNIK, M. HATALA a S. LEGUTKO. The influence of cutting conditions on the selected parameters of the surface integrity. *Acta Polytechnica*. 2018, vol. 58, n. 6, s. 334-338. DOI: 10.14311/AP.2018.58.0334. ISSN 1805-2363. Dostupné také z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/5043>. - **WoS**
- XV. PAGAC M., J. HAJNYS, **S. MALOTOVA**, T. ZLAMAL a J. PETRU. The influence of the laser power on the utility properties of the surface roughness parameter of the overhangs during the SLM proces. In: *METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: Tanger, 2018, s. 814-819. ISBN 978-808729484-0. - **WoS**
- XVI. ZLAMAL T., J. PETRU, **S. MALOTOVA**, R. CEP a J. HAJNYS. The influence of microgeometry of cutting tool on dynamic load of system. In: *METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: Tanger, 2018, s. 1795-1800. ISBN 978-808729484-0. - **WoS**
- XVII. ZLAMAL T., **S. MALOTOVA**, J. PETRU, Z. BRYTAN a V. MUSIL. The evaluation of the surface quality after laser cutting. The evaluation of the surface quality after laser cutting. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 244. DOI: 10.1051/mateconf/201824402009. ISSN 2261-236X. Dostupné také z: <https://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201824402009>.
- XVIII. ZLAMAL T., **S. MALOTOVA**, T. SZOTKOWSKI, R. CEP, I. D. MARINESCU. The Geometry of Grooving Tool and Its Influence on Dynamic Load System for Turning. In: *TRANSCOM 2019 - 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*. Nový Smokovec, Vysoké Tatry, Slovensko: 2019, p. 8. – **v tisku WoS**

VE STAVU ŘÍZENÍ

- XIX. ZLAMAL T., I. MRKVICA, **S. MALOTOVA**, O. VORTEL a T. VOPAT. Effect of cutting tool microgeometry on the aluminium alloy machining process. *MM Science Journal*, 2019, vol. X, n. Y, 5 s. ISBN: 180XXXXX –**Scopus**
- XX. ZLAMAL T., **S. MALOTOVA**, T. SZOTKOWSKI, O. VORTEL a. TREFIL. Machining of Nickel Alloy by Cutting Tool with Prepared Cutting Edge. In: *METAL 2019 : 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: Tanger, 2019, s. xx. ISBN 978-80xxxx. –**WoS**
- XXI. ZLAMAL T., **S. MALOTOVA**, J. LICHOVNIK, R. CEP a M. BORZAN. Surface Microgeometry and its Influence on the Strength of Bonded Joint. In: *MTeM 2019: 14 International Conference on Modern Technologies in Manufacturing*, Romania, 2019, vol. XX, n. YY, s. ZZ. ISBN: 978-27598XXYYZZ. –**WoS**
- XXII. ZLAMAL T., I. MRKVICA, T. SZOTKOWSKI a **S. MALOTOVA**. The Influence of Surface Treatment of PVD Coating on Its Quality and Wear Resistant. *Coating Journal : special issue*. 2019, vol. 10, n. 3, s. 8. ISBN: XXXX. –**IF 2,350 (Q2)**

NEHODNOCENÉ PUBLIKACE

- XXIII. **MALOTOVA S.**, R. CEP, T. ZLAMAL, M. PAGAC a V. MUSIL. The Evaluation of Residual Stress after High-Feed Milling with Using X-Ray Diffraction. In: *ICMMME 2018 : 20th International Conference on Mechanical, Mechatronics and Manufacturing Engineering*. Singapore: 2018, vol. 20, n. 1, 54 – 57 s.

- XXIV. KYNCL L., **S. MALOTOVA**, P. NOVACEK, H. NICIELNIK, D. SOKOVA, P. HEMZSKY, D. PITELA a J. HOLUBJAK. Testing of Choiced Ceramics Cutting Tools at Irregular Interrupted Cut. *Technological Engineering: Technologické Inžinierstvo*. Slovakia, vol. 10/2015, n. 2, s. 10-13. ISSN 1336-5967.
- XXV. **MALOTOVA S.**, P. HEMZSKY, D. PITELA, H. NICIELNIK, D. SOKOVA, L. KYNCL a J. MRAZIK. Evaluation of Residual Stresses in Inner Ring of the Bearing. *Technological Engineering: Technologické Inžinierstvo*. Slovakia, vol. 10/2015, n. 2, s. 21-23. ISSN 1336-5967.
- XXVI. CEP R., **S. MALOTOVA**, M. PAGAC, M. SADILEK a J. LICHOVNIK. Parameters Influence of CO₂ Laser on Cutting Quality of Polymer Materials. In: *Transaction of the VŠB – Technical University of Ostrava*. Ostrava: 2013, vol. 58, no. 1, S. 9 – 16. ISSN 1210-0471.
- XXVII. **MALOTOVA S.**, R. CEP, V. VRBA, V. MUSIL, J. HAJNYS a J. LICHOVNIK. Measuring of Residual stress into Cutting Inserts after Grinding. In: *8th International Technical Conference – Technological Forum 2017*. Špindlerův Mlýn, Česká republika: 2017, s. 181 – 184. ISBN: 978-80-87583-22-7
- XXVIII. **MALOTOVA S.** Vliv technologických parametrů na povrchová napětí při obrábění na simulátoru přerušovače řezu: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 70 s. Vedoucí práce: ČEP, R.
- XXIX. **MALOTOVA S.** Výroba tělesa motoru: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní Katedra obrábění, montáže, 2013, 52 s. Vedoucí práce: PETŘKOVSKÁ, L.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Technologie upichování	11
Obr. 1.2 Tvorba čepu při upichování	12
Obr. 1.3 Silové rozložení řezných sil při upichování	13
Obr. 1.4 Utváření třísky při upichování.....	14
Obr. 1.5 Příklady utvařečů vhodných pro upichování	15
Obr. 1.6 Mechanismy opotřebení upichovacích nožů	16
Obr. 1.7 Typy destiček dle velikosti úhlu nastavení hlavního ostří a jeho vliv na tvorbu čepu	18
Obr. 1.8 Úprava mikrogeometrie bříty řezného nástroje	19
Obr. 1.9 Systém tvarového soustružení Seco MDT	20
Obr. 1.10 Koncepce CoroCut QD – upichování v ose Y	20
Obr. 1.11 Systém Jet-cut ISCAR	21
Obr. 1.12 Rozdělení korozivzdorných ocelí s ukázkou jejich mikrostruktur	22
Obr. 1.13 Diagram základních vlastností austenitické oceli	24
Obr. 1.14 Mechanismy opotřebení řezných nástrojů	26
Obr. 1.15 Optimalizace opotřebení bříty řezného nástroje	27
Obr. 1.16 Tvorba třísky v závislosti na kombinaci posuvu a hloubky řezu.....	29
Obr. 1.17 Vliv řezných parametrů na trvanlivost řezného nástroje	29
Obr. 3.1 CNC soustruh NLX2500MC/700	35
Obr. 3.2 Použitý řezný nástroj a) – vyměnitelná břitová destička; b) – nožový držák průřezu 25x25 mm.....	36
Obr. 3.3 Ostří nástroje před a po mechanické úpravě povrchu	37
Obr. 3.4 Břit upichovací destičky.....	38
Obr. 3.5 Substrát vyměnitelných břitových destiček.....	39
Obr. 3.6 Závislost množství pojiva a velikosti zrna WC na vlastnosti SK.....	39
Obr. 3.7 Vlastnosti jednotlivých vrstev povlaku	40
Obr. 3.8 Použitý PVD povlak na lomové ploše.....	41
Obr. 3.9 Úběr povlaku po aplikaci mechanické úpravy povrchu (10 000x zvětšeno)	42
Obr. 4.1 Postup plánování experimentů	44
Obr. 4.2 Proces DOE	45
Obr. 4.3 Proces upichování dle DOE.....	45
Obr. 4.4 Schéma experimentální činnosti	49
Obr. 5.1 Paretův diagram	54
Obr. 5.2 Výsledky residuí a) Závislosti predikovaných hodnot na residuí; b) Normálně pravděpodobnostní graf	55

Obr. 5.3 Vyhodnocení residuí u naměřených hodnot	56
Obr. 5.4 Grafický příklad interakce faktorů A a B.....	56
Obr. 5.5 Hlavní účinky modelu.....	57
Obr. 5.6 Závislost plochy odezvy Q na dvou faktorech při konstantním r_n a L.....	58
Obr. 5.7 Diagram interakcí pro původní model	59
5.8 Paretův diagram pro optimalizovaný model.....	61
5.9 Vyhodnocení residuí a) histogram b) normálně pravděpodobnostní graf	62
Obr. 5.10 Porovnání odchylek pro původní a optimalizovaný model	62
Obr. 5.11 Diagram interakcí optimalizovaného modelu.....	63
Obr. 6.1 Předvrtaný polotovár	65
Obr. 6.2 Uváznutý materiál	66
Obr. 6.3 Výsledný povrch kroužku vlevo – vznik otřepu, vpravo – znehodnocený povrch	66
Obr. 6.4 Opatření nástroje s ohledem na teplotu bříty	67
Obr. 6.5 Tvorba nárůstku za nízkých řezných podmínek	68
Obr. 6.6 Opatření VBD ($f = 0,12 \text{ mm}$, $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) vlevo – nárůstek na vedlejším ostří, vpravo – plastická deformace	69
Obr. 6.7 Poškození bříty nástroje VBD	69
Obr. 6.8 Opatření VBD – $r_n = 40 \text{ } \mu\text{m}$ vyštípnutí špičky	70
Obr. 6.9 Opatření VBD za vysokých řezných podmínek.....	70
Obr. 6.10 Utváření třísky pro různé materiály	72
Obr. 6.11 Tvorba třísky pro konvenční obrábění	73
Obr. 6.12 Odlomení třísky na základě jejího zakřivení, kontaktu s obrobkem a řezným nástrojem..	74
Obr. 6.13 Tvorba třísky během upichování oceli 316L a) dobré - šnekovité utváření třísky; b) špatná – dlouhá, spirálovitá tříska	75
Obr. 6.14 Vybrané parametry drsnosti	78
Obr. 6.15 Hodnocení parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz.....	81
Obr. 6.16 Drsnost povrchu pro kroužek tl. 5 mm	82
Obr. 6.17 Vizuální kontrola kroužků	82

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Formy opotřebení VBD	28
Tab. 3.1 Chemické složení austenitické oceli W. Nr. 1.4404 v hm %	33
Tab. 3.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti austenitické oceli W. Nr. 1.4404	33
Tab. 3.3 Náměry testovaných VBD	38
Tab. 3.4 Složení a vlastnosti slinutého karbidu WC – Co (interní podklady společnosti DORMER Pramet s.r.o)	40
Tab. 4.1 Vstupní faktory a jejich úrovně	47
Tab. 4.2 Plán experimentu 2 ⁴	47
Tab. 5.1 Opotřebení řezného nástroje pro funkční testy	51
Tab. 5.2 Dílčí testy faktorů a jejich kombinací	53
Tab. 5.3 Nevýznamné faktory a jejich kombinace	60
Tab. 5.4 Dílčí testy pro optimalizovaný model	61
Tab. 6.1 Vizuální porovnání nového a opotřebeného bříty	71
Tab. 6.2 Tvorba třísky při upichování	76
Tab. 6.3 Statistické zpracování drsnosti povrchu pro 10 měření u jednoho kroužku	80
Tab. 1 Kódované proměnné	114
Tab. 2 Stanovení residuí pro původní model	115
Tab. 3 Stanovení residuí pro optimalizovaný model	116

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 *Kódované proměnné experimentu*
- Příloha č. 2 *Stanovení residuí pro původní model*
- Příloha č. 3 *Stanovení residuí pro optimalizovaný model*

Příloha č. 1

Tab. 1 Kódované proměnné

StdOrder	RunOrder	Blok	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm]	r_n [μm]	L	Q [ks]
9	1	1	200	0,08	25	0	55
5	2	1	110	0,12	25	1	120
16	3	1	200	0,12	40	1	33
32	4	1	110	0,12	25	0	120
15	5	1	110	0,08	25	1	120
12	6	1	110	0,08	40	0	120
23	7	1	110	0,08	25	0	110
22	8	1	200	0,08	40	1	120
1	9	1	110	0,08	40	1	120
25	10	1	200	0,12	25	0	30
17	11	1	110	0,08	25	1	120
7	12	1	200	0,12	25	1	43
6	13	1	110	0,08	40	1	120
29	14	1	200	0,08	40	0	85
28	15	1	200	0,12	25	0	25
27	16	1	200	0,12	40	1	25
14	17	1	200	0,12	40	0	50
30	18	1	200	0,08	25	0	120
13	19	1	200	0,08	25	1	90
19	20	1	200	0,08	40	0	55
10	21	1	200	0,08	25	1	90
4	22	1	110	0,12	40	0	60
11	23	1	110	0,08	40	0	120
21	24	1	200	0,08	40	1	120
2	25	1	110	0,12	25	1	120
26	26	1	200	0,12	40	0	50
3	27	1	110	0,12	25	0	120
24	28	1	200	0,12	25	1	45
31	29	1	110	0,12	40	1	95
20	30	1	110	0,08	25	0	120
18	31	1	110	0,12	40	1	90
8	32	1	110	0,12	40	0	55

Příloha č. 2

Tab. 2 Stanovení residuí pro původní model

Pokus	$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$f [\text{mm}]$	$r_n [\mu\text{m}]$	$L [-]$	Q_{nam}	Q_{pred}	Residua
1	200	0,08	25	0	55	89,19	34,19
2	110	0,12	25	1	120	119,94	0,06
3	200	0,12	40	1	33	29,16	3,84
4	110	0,12	25	0	120	121,255	1,255
5	110	0,08	25	1	120	120,36	0,36
6	110	0,08	40	0	120	121,272	1,272
7	110	0,08	25	0	110	116,145	6,145
8	200	0,08	40	1	120	120,84	0,84
9	110	0,08	40	1	120	120,372	0,372
10	200	0,12	25	0	30	29,41	0,59
11	110	0,08	25	1	120	120,36	0,36
12	200	0,12	25	1	43	44,25	1,25
13	110	0,08	40	1	120	120,372	0,372
14	200	0,08	40	0	85	71,88	13,12
15	200	0,12	25	0	25	29,41	4,41
16	200	0,12	40	1	25	29,16	4,16
17	200	0,12	40	0	50	52,12	2,12
18	200	0,08	25	0	120	89,19	30,81
19	200	0,08	25	1	90	90,75	0,75
20	200	0,08	40	0	55	71,88	16,88
21	200	0,08	25	1	90	90,75	0,75
22	110	0,12	40	0	60	58,888	1,112
23	110	0,08	40	0	120	121,272	1,272
24	200	0,08	40	1	120	120,84	0,84
25	110	0,12	25	1	120	119,94	0,06
26	200	0,12	40	0	50	52,12	2,12
27	110	0,12	25	0	120	121,255	1,255
28	200	0,12	25	1	45	44,25	0,75
29	110	0,12	40	1	95	92,268	2,732
30	110	0,08	25	0	120	116,145	3,855
31	110	0,12	40	1	90	92,268	2,268
32	110	0,12	40	0	55	58,888	3,888

Příloha č. 3

Tab. 3 Stanovení residuí pro optimalizovaný model

Pokus	$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$f [\text{mm}]$	$r_n [\mu\text{m}]$	$L [-]$	Q'_{nam}	Q'_{pred}	Residua
1	200	0,08	25	0	55	86,87	31,87
2	110	0,12	25	1	120	102,51	17,49
3	200	0,12	40	1	33	30,13	2,87
4	110	0,12	25	0	120	118,13	1,87
5	110	0,08	25	1	120	126,87	6,87
6	110	0,08	40	0	120	126,25	6,25
7	110	0,08	25	0	110	111,25	1,25
8	200	0,08	40	1	120	112,49	7,51
9	110	0,08	40	1	120	110,63	9,37
10	200	0,12	25	0	30	29,51	0,49
11	110	0,08	25	1	120	126,87	6,87
12	200	0,12	25	1	43	45,13	2,13
13	110	0,08	40	1	120	110,63	9,37
14	200	0,08	40	0	85	96,87	11,87
15	200	0,12	25	0	25	29,51	4,51
16	200	0,12	40	1	25	30,13	5,13
17	200	0,12	40	0	50	45,75	4,25
18	200	0,08	25	0	120	86,87	33,13
19	200	0,08	25	1	90	71,25	18,75
20	200	0,08	40	0	55	96,87	41,87
21	200	0,08	25	1	90	71,25	18,75
22	110	0,12	40	0	60	76,89	16,89
23	110	0,08	40	0	120	126,25	6,25
24	200	0,08	40	1	120	112,49	7,51
25	110	0,12	25	1	120	102,51	17,49
26	200	0,12	40	0	50	45,75	4,25
27	110	0,12	25	0	120	118,13	1,87
28	200	0,12	25	1	45	45,13	0,13
29	110	0,12	40	1	95	92,51	2,49
30	110	0,08	25	0	120	111,25	8,75
31	110	0,12	40	1	90	92,51	2,51
32	110	0,12	40	0	55	76,89	21,89